

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

IN RE APPLICATION OF: Atsushi SAKAI et al.

GAU: 2875

SERIAL NO: 10/825,373

EXAMINER:

FILED: April 16, 2004

FOR: LIGHT CONTROL ELEMENT AND LIGHT CONTROL DEVICE

REQUEST FOR PRIORITY

COMMISSIONER FOR PATENTS
ALEXANDRIA, VIRGINIA 22313

SIR:

- ☐ Full benefit of the filing date of U.S. Application Serial Number , filed , is claimed pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §120.
- ☐ Full benefit of the filing date(s) of U.S. Provisional Application(s) is claimed pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §119(e): Application No. Date Filed
- ☒ Applicants claim any right to priority from any earlier filed applications to which they may be entitled pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §119, as noted below.

In the matter of the above-identified application for patent, notice is hereby given that the applicants claim as priority:

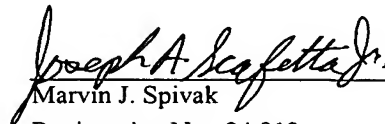
<u>COUNTRY</u>	<u>APPLICATION NUMBER</u>	<u>MONTH/DAY/YEAR</u>
JAPAN	2003-113591	April 18, 2003

Certified copies of the corresponding Convention Application(s)

- ☒ are submitted herewith
- ☐ will be submitted prior to payment of the Final Fee
- ☐ were filed in prior application Serial No. filed
- ☐ were submitted to the International Bureau in PCT Application Number
Receipt of the certified copies by the International Bureau in a timely manner under PCT Rule 17.1(a) has been acknowledged as evidenced by the attached PCT/IB/304.
- ☐ (A) Application Serial No.(s) were filed in prior application Serial No. filed ; and
- ☐ (B) Application Serial No.(s)
- ☐ are submitted herewith
- ☐ will be submitted prior to payment of the Final Fee

Respectfully Submitted,

OBLON, SPIVAK, McCLELLAND,
MAIER & NEUSTADT, P.C.


Marvin J. Spivak

Registration No. 24,913

Joseph A. Scafetta, Jr.
Registration No. 26, 803

Customer Number

22850

Tel. (703) 413-3000
Fax. (703) 413-2220
(OSMMN 05/03)

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 4 月 1 8 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 1 1 3 5 9 1
Application Number:

ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 1 1 3 5 9 1]

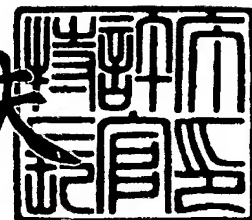
願 人 株式会社リコー
Applicant(s):

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

2 0 0 4 年 4 月 1 2 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 0302983

【提出日】 平成15年 4月18日

【あて先】 特許庁長官 太田 信一郎 殿

【国際特許分類】 G02B 26/08

【発明の名称】 光制御素子及び光制御デバイス

【請求項の数】 18

【発明者】

【住所又は居所】 東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号 株式会社リコー内

【氏名】 坂井 篤

【発明者】

【住所又は居所】 東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号 株式会社リコー内

【氏名】 加藤 幾雄

【特許出願人】

【識別番号】 000006747

【氏名又は名称】 株式会社リコー

【代表者】 桜井 正光

【代理人】

【識別番号】 100101177

【弁理士】

【氏名又は名称】 柏木 慎史

【電話番号】 03(5333)4133

【選任した代理人】

【識別番号】 100102130

【弁理士】

【氏名又は名称】 小山 尚人

【電話番号】 03(5333)4133

**【選任した代理人】****【識別番号】** 100072110**【弁理士】****【氏名又は名称】** 柏木 明**【電話番号】** 03(5333)4133**【手数料の表示】****【予納台帳番号】** 063027**【納付金額】** 21,000円**【提出物件の目録】****【物件名】** 明細書 1**【物件名】** 図面 1**【物件名】** 要約書 1**【包括委任状番号】** 9808802**【包括委任状番号】** 0004335**【プルーフの要否】** 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光制御素子及び光制御デバイス

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 基板と、

この基板上にフォトニック結晶構造により形成された光結合部品と、

前記フォトニック結晶構造の一部に設けられて前記光結合部品を少なくとも 2 つの領域に区分する屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで区分される前記領域の界面で少なくとも 1 つの波数に対して反射作用を呈して光の進行方向を変化させるようにした光制御素子。

【請求項 2】 基板と、

この基板上に形成された光導波路と、

前記基板上にフォトニック結晶構造により形成されて前記光導波路が接続された光結合部品と、

前記フォトニック結晶構造の一部に設けられて前記光結合部品を少なくとも 2 つの領域に区分する屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで区分される前記領域の界面で少なくとも 1 つの波数に対して反射作用を呈して光の進行方向を変化させるようにした光制御素子。

【請求項 3】 基板と、

この基板上に形成された複数本の光導波路と、

前記基板上に形成されて少なくとも 3 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、

接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成されたフォトニック結晶構造と、

を備え、

前記フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させ

ることで当該フォトニック結晶構造に対応する前記光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにした光制御素子。

【請求項4】 基板と、

この基板上に形成された複数本の光導波路と、

前記基板上にフォトニック結晶構造で多角形状に形成されて少なくとも4本の前記光導波路が接続された光結合部品と、

多角形状の前記光結合部品の対角線を結ぶ領域で区分された複数の屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路からの光の進行方向を偏向させるようにした光制御素子。

【請求項5】 基板と、

この基板上に形成された複数本の光導波路と、

前記基板上にフォトニック結晶構造で多角形状に形成されて少なくとも4本の前記光導波路が接続された光結合部品と、

接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成されたフォトニック結晶構造と、

前記光導波路上に形成されたフォトニック結晶構造部分及び多角形状の前記光結合部品の対角線を結ぶ領域で区分された複数の屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路からの光の進行方向を偏向させるようにした光制御素子。

【請求項6】 基板と、

この基板上に形成された複数本の光導波路と、

前記基板上にフォトニック結晶構造で多角形状に形成されて少なくとも4本の前記光導波路が接続された光結合部品と、

多角形状の前記光結合部品の対角線を結ぶ領域で区分された複数の屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路からの光を分岐させるようにした光制御素子。

【請求項 7】 基板と、

この基板上に形成された複数本の光導波路と、

少なくとも 3 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、

接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成され、電氣的横波を反射又は透過する構造と、磁氣的横波を反射又は透過する構造とを含む少なくとも 2 種類のフォトニック結晶構造と、

これらのフォトニック結晶構造部分に設定されて電氣的横波又は磁氣的横波の透過率が変化する屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで電氣的横波と磁氣的横波とを分離させるようにした光制御素子。

【請求項 8】 基板と、

この基板上に形成された複数本の光導波路と、

少なくとも 3 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、

接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成され、電氣的横波を反射又は透過する構造と、磁氣的横波を反射又は透過する構造とを含む少なくとも 2 種類のフォトニック結晶構造と、

これらのフォトニック結晶構造部分に設定されて電氣的横波又は磁氣的横波の透過率が変化する屈折率可変部分と、

を備え、

前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにした光制御素子。

【請求項 9】 前記フォトニック結晶構造は、欠陥部分を有する、請求項 2 ないし 8 の何れか一記載の光制御素子。

【請求項 10】 前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造は、少なくとも 2 層のフォトニック結晶配列からなり、前記欠陥部分を有する層間若しくはフォトニック結晶構造部分全体に対して屈折率を変化させるようにした

、請求項 9 記載の光制御素子。

【請求項 11】 前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造は、少なくとも 2 層の同じ層数のフォトニック結晶配列からなり、前記欠陥部分を有する層間若しくはフォトニック結晶構造部分全体に対して屈折率を変化させるようにした、請求項 9 記載の光制御素子。

【請求項 12】 前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造のフォトニック結晶配列が 10 層以下である、請求項 10 又は 11 記載の光制御素子。

【請求項 13】 前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造の前記欠陥部分の直線方向に直交する方向以外にフォトニック結晶を伝播して前記欠陥部分に入射する伝播波の伝播波数ベクトル成分を有する、請求項 10 ないし 12 の何れか一記載の光制御素子。

【請求項 14】 前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造は、大きさの異なる複数の欠陥部分を有する、請求項 3、9 ないし 13 の何れか一記載の光制御素子。

【請求項 15】 フォトニック結晶構造を有する基板と、
前記基板上の前記フォトニック結晶構造中に形成された複数本のフォトニック結晶線欠陥導波路と、
これらのフォトニック結晶線欠陥導波路が交差した光結合部分に設定された屈折率可変部分と、
を備え、
前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで前記光結合部分の共振状態を制御させるようにした光制御素子。

【請求項 16】 フォトニック結晶構造を有する基板と、
前記基板上の前記フォトニック結晶構造中に形成された複数本のフォトニック結晶線欠陥導波路と、
これらのフォトニック結晶線欠陥導波路により分離されたフォトニック結晶部分に各々設定された屈折率可変部分と、
を備え、

これらの前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させるようにした光制御素子。

【請求項 17】 基板と、

この基板上に 2 次元に交差させて形成された $N \times N$ 本の光導波路と、

これらの光導波路の交差部分に各々配設されて対応する光導波路が接続された N^2 個の光結合部品と、
を備え、

前記光結合部品部分周りが各々屈折率可変部分を含む請求項 1 ないし 14 の何れか一記載の光制御素子として形成されている光制御デバイス。

【請求項 18】 フォトニック結晶構造を有する基板と、

前記基板上の前記フォトニック結晶構造中に 2 次元に交差させて形成された $N \times N \times N$ 本のフォトニック結晶線欠陥導波路と、
を備え、

これらのフォトニック結晶線欠陥導波路が交差した光結合部分が各々屈折率可変部分を含む請求項 15 又は 16 記載の光制御素子として形成されている光制御デバイス。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、フォトニック結晶構造を利用し光スイッチや光強度変調器等に応用可能な光制御素子及び光制御デバイスに関する。

【0002】

【従来の技術】

フォトニック結晶は、波長程度の誘電体周期構造により、光子の禁制帯であるフォトニックバンドギャップを形成することや、強い分散性により特異な効果を示す点で、超微小光集積回路や新機能光素子として期待されている。これらの特性を利用することで、極めて微小な光経路変更機能を持つ光スイッチや光強度変調器などの光制御素子が構成できる。

【0003】

光の経路変換器としては、その応用や材料によって様々な構成が提案されている。

例えば、特許文献 1 によれば、屈折率が整合した作動流体にそれとは異なる屈折率を持つ光路変更液体を移動させることで、光の経路を変更させるようにしている。

【0004】

また、特許文献 2 によれば、光導波路の間に電磁石に挟まれたミラーを挿入することで、ミラーを動かして光の経路を変更させるようにしている。

【0005】

さらに、基幹系の光通信では、Micro Electro-mechanical system:MEMS 技術による、反射鏡を使ったシステムが利用されている。

【0006】

ところが、これらの方法では、構成が簡単で消光比が大きく取れるという利点があるものの、熱式圧力発生装置や電磁石による機械的な物体移動を利用していることから、スイッチングスピードを速くすることが困難である。

【0007】

この点、高速な光スイッチとしては、ニオブ酸リチウムで構成された方向性結合器型若しくはマッハツェンダー型が一般的であり製品化がされているが、素子長が数 cm と大きいために、半導体チップが配置されたボード内の光インタコネクション用光スイッチに用いることは困難である。

【0008】

一方、フォトリソニック結晶を用いた光経路変換器としては、スーパプリズム効果 (PRL B, vol. 58, p. 10096, 1998) と呼ばれるフォトリソニック結晶が持つ強い分散性を利用する方法が提案されている。スーパプリズム効果を利用した光路変換器は、例えば、特許文献 3 によりその構成例が示されている。

【0009】

図 18 は特許文献 3 により提案されている構成例の一つを示すものであり、電流注入前の導波路 201 を介してフォトリソニック結晶 202 の固有軸に対して斜めに入射され、フォトリソニック結晶中を伝搬する光の軌跡はフォトリソニック結晶 202

の分散特性によって図中、実線矢印で示す方向とする。即ち、チャンネル 1 (CH 1) の導波路 203 へ光が出力される。一方、電流注入を行うとフォトニック結晶 202 を構成する媒質の屈折率が変化し、それに応じて屈折角が変化することで、伝搬光の軌跡は図中、破線矢印で示す方向に変化し、チャンネル 2 (CH 2) の導波路 204 へ光が出力される。即ち、スーパプリズム効果により偏向角が大きく変わるために出射側導波路 204 に光がスイッチングされる方式である。

【0010】

【特許文献 1】

特開 2002-221680 公報

【特許文献 2】

特開 2002-122798 公報

【特許文献 3】

特開 2002-303836 公報

【0011】

【発明が解決しようとする課題】

ところが、フォトニック結晶によるスーパプリズム効果は入射角度、光の波長に極めて敏感であり、波長が少しでも変化すると偏向角が大きく変化してしまう。また、フォトニック結晶に対する入射角を固定する必要がある、端面での反射も強く存在するために実用上の応用には解決しなくてはならない点が多い。

【0012】

また、フォトニック結晶をマッハツェンダーや方向性結合器で組み合わせられる干渉計に組み込んで、光の変調や光路変更を実現しようとする方式もあるが、具体的な構成法が詳しく考慮されたものは殆どなく、実用化された素子はない。

【0013】

本発明の目的は、フォトニック結晶構造部分の屈折率を変調することで各種の光路変更を実現できる小型で高性能な光制御素子及び光制御デバイスを提供することである。

【0014】

より具体的には、光導波路幅と同程度の大きさを持つ微細で消光比が大きく、高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供することである。

【0015】

また、フォトニック結晶の偏光特性から生ずる設計の許容範囲を拡大できる光制御素子を提供することである。

【0016】

また、極めて微小な領域で構成され、光子の捕捉と開放が可能な光制御素子を提供することである。

【0017】

【課題を解決するための手段】

請求項1記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上にフォトニック結晶構造により形成された光結合部品と、前記フォトニック結晶構造の一部に設けられて前記光結合部品を少なくとも2つの領域に区分する屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで区分される前記領域の界面で少なくとも1つの波数に対して反射作用を呈して光の進行方向を変化させるようにした。

【0018】

従って、光の進行方向を変化させるために機械的な物体移動を利用しないので、消光比が大きくて高速で安定した光経路変換器等の光制御素子を構成できる。また、光の進行方向の変化に反射作用を利用しているので、複雑な光の干渉系や光回路の構成をとることなく、光スイッチ等の光制御素子を構成できる。

【0019】

請求項2記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された光導波路と、前記基板上にフォトニック結晶構造により形成されて前記光導波路が接続された光結合部品と、前記フォトニック結晶構造の一部に設けられて前記光結合部品を少なくとも2つの領域に区分する屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで区分される前記領域の界面で少なくとも1つの波数に対して反射作用を呈して光の進行方向を変化させるようにした。

【0020】

従って、請求項 1 記載の発明に加えて、光信号の経路変換器を光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積にて実現できる。さらには、フォトニック結晶のバンドギャップを利用することで、角度成分を持つビーム上の光を高効率で反射させることができるため、単一モードの導波路である必要はなく、多モードの導波路でも光導波路を構成することが可能となる。

【0021】

請求項 3 記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された複数本の光導波路と、前記基板上に形成されて少なくとも 3 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成されたフォトニック結晶構造と、を備え、前記フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させることで当該フォトニック結晶構造に対応する前記光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにした。

【0022】

従って、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させて当該フォトニック結晶構造に対応する光導波路を伝送する光の透過率を変化させることで、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供できる。

【0023】

請求項 4 記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された複数本の光導波路と、前記基板上にフォトニック結晶構造で多角形状に形成されて少なくとも 4 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、多角形状の前記光結合部品の対角線を結ぶ領域で区分された複数の屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路からの光の進行方向を偏向させるようにした。

【0024】

従って、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させて光導波路からの光の進行方向を偏向させることで、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供できる。

【 0 0 2 5 】

請求項 5 記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された複数本の光導波路と、前記基板上にフォトニック結晶構造で多角形状に形成されて少なくとも 4 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成されたフォトニック結晶構造と、前記光導波路上に形成されたフォトニック結晶構造部分及び多角形状の前記光結合部品の対角線を結ぶ領域で区分された複数の屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路からの光の進行方向を偏向させるようにした。

【 0 0 2 6 】

従って、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を独立して変化させて光導波路からの光の進行方向を偏向させることで、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供できる。

【 0 0 2 7 】

請求項 6 記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された複数本の光導波路と、前記基板上にフォトニック結晶構造で多角形状に形成されて少なくとも 4 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、多角形状の前記光結合部品の対角線を結ぶ領域で区分された複数の屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路からの光を分岐させるようにした。

【 0 0 2 8 】

従って、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を独立して変化させて光導波路からの光を分岐させることで、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供できる。

【 0 0 2 9 】

請求項 7 記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された複数本の光導波路と、少なくとも 3 本の前記光導波路が接続された光結合部品と、接続

された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成され、電氣的横波を反射又は透過する構造と、磁氣的横波を反射又は透過する構造とを含む少なくとも2種類のフォトニック結晶構造と、これらのフォトニック結晶構造部分に設定されて電氣的横波又は磁氣的横波の透過率が変化する屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで電氣的横波と磁氣的横波とを分離させるようにした。

【0030】

従って、光導波路上に少なくとも2種類のフォトニック結晶構造を持たせて屈折率可変部分とし、その屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで電氣的横波と磁氣的横波とを分離させるようにしたので、フォトニック結晶の偏光特性から生ずる当該光制御素子の偏光依存性を解消することができ、偏光特性から生ずる設計の許容範囲を拡大することができる。

【0031】

請求項8記載の発明の光制御素子は、基板と、この基板上に形成された複数本の光導波路と、少なくとも3本の前記光導波路が接続された光結合部品と、接続された前記光結合部品側の端部に位置させて前記光導波路上に形成され、電氣的横波を反射又は透過する構造と、磁氣的横波を反射又は透過する構造とを含む少なくとも2種類のフォトニック結晶構造と、これらのフォトニック結晶構造部分に設定されて電氣的横波又は磁氣的横波の透過率が変化する屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで前記光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにした。

【0032】

従って、光導波路上に少なくとも2種類のフォトニック結晶構造を持たせて屈折率可変部分とし、その屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにしたので、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供できる。

【0033】

請求項9記載の発明は、請求項2ないし8の何れか一記載の光制御素子におい

て、前記フォトニック結晶構造は、欠陥部分を有する。

【0034】

従って、例えば0.01以下の微小な屈折率変化で光信号の透過率を制御することが可能となる。

【0035】

請求項10記載の発明は、請求項9記載の光制御素子において、前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造は、少なくとも2層のフォトニック結晶配列からなり、前記欠陥部分を有する層間若しくはフォトニック結晶構造部分全体に対して屈折率を変化させるようにした。

【0036】

従って、請求項9記載の発明に加えて、フォトニック結晶全体又は特定領域全体の屈折率変化を生じさせる方法以外に、欠陥部分のみの屈折率変化を生じさせることができる。

【0037】

請求項11記載の発明は、請求項9記載の光制御素子において、前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造は、少なくとも2層の同じ層数のフォトニック結晶配列からなり、前記欠陥部分を有する層間若しくはフォトニック結晶構造部分全体に対して屈折率を変化させるようにした。

【0038】

従って、請求項9記載の発明に加えて、欠陥部分からの層数を同じにすることで、光の入出射面からのフォトニック結晶層数が均等になるために、より効率よく光の経路を変更できる。

【0039】

請求項12記載の発明は、請求項10又は11記載の光制御素子において、前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造のフォトニック結晶配列が10層以下である。

【0040】

従って、請求項10又は11記載の発明に加えて、欠陥部分を挟むフォトニック結晶の層数を制御することで、欠陥部分での共振器特性を変化させ、光の透過

率を保ちながら屈折率変化により光を偏向させることができる。

【0041】

請求項13記載の発明は、請求項10ないし12の何れか一記載の光制御素子において、前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造の前記欠陥部分の直線方向に直交する方向以外にフォトニック結晶を伝播して前記欠陥部分に入射する伝播波の伝播波数ベクトル成分を有する。

【0042】

従って、請求項10ないし12記載の発明に加えて、2次元面内で形成されたフォトニック結晶構造の欠陥部分に対して傾いている波数を持つ光を入射しても、光の透過率を制御することができる。

【0043】

請求項14記載の発明は、請求項3、9ないし13の何れか一記載の光制御素子において、前記光導波路上に形成された前記フォトニック結晶構造は、大きさの異なる複数の欠陥部分を有する。

【0044】

従って、等価波長帯域幅を広げることとも可能となり、例えば、半導体レーザの発振波長の揺らぎに対する許容範囲を広げた光スイッチや光変調器等の光制御素子を構成することが可能となる。

【0045】

請求項15記載の発明の光制御素子は、フォトニック結晶構造を有する基板と、前記基板上の前記フォトニック結晶構造中に形成された複数本のフォトニック結晶線欠陥導波路と、これらのフォトニック結晶線欠陥導波路が交差した光結合部分に設定された屈折率可変部分と、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで前記光結合部分の共振状態を制御させるようにした。

【0046】

従って、フォトニック結晶線欠陥導波路が交差した光結合部分に設定された屈折率可変部分の屈折率を変化させることで、光結合部分の共振状態を制御させることにより、光信号の捕捉と開放とが可能となる光スイッチ、光信号遅延素子、光フィルタ等の光制御素子を構成することができる。

【0047】

請求項16記載の発明の光制御素子は、フォトリック結晶構造を有する基板と、前記基板上の前記フォトリック結晶構造中に形成された複数本のフォトリック結晶線欠陥導波路と、これらのフォトリック結晶線欠陥導波路により分離されたフォトリック結晶部分に各々設定された屈折率可変部分と、を備え、これらの前記屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させるようにした。

【0048】

従って、フォトリック結晶線欠陥導波路により分離されたフォトリック結晶部分に各々設定された屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることにより、光信号の捕捉と開放とが可能となる光スイッチ、光信号遅延素子、光フィルタ等の光制御素子を構成することができる。

【0049】

請求項17記載の発明の光制御デバイスは、基板と、この基板上に2次元に交差させて形成された $N \times N$ 本の光導波路と、これらの光導波路の交差部分に各々配設されて対応する光導波路が接続された N^2 個の光結合部品と、を備え、前記光結合部品部分周りが各々屈折率可変部分を含む請求項1ないし14の何れか一記載の光制御素子として形成されている。

【0050】

従って、 $N \times N$ マトリックススイッチなる光制御デバイスを極めて微小な領域に構成することが可能となり、電子回路基板上に配置可能となり、よって、ボード内の光インタコネクション用光スイッチとして利用することができる。

【0051】

請求項18記載の発明の光制御デバイスは、フォトリック結晶構造を有する基板と、前記基板上の前記フォトリック結晶構造中に2次元に交差させて形成された $N \times N \times N$ 本のフォトリック結晶線欠陥導波路と、を備え、これらのフォトリック結晶線欠陥導波路が交差した光結合部分が各々屈折率可変部分を含む請求項15又は16記載の光制御素子として形成されている。

【0052】

従って、2次元に交差させて形成された $N \times N \times N$ 本のフォトリック結晶線欠

陷導波路によるマトリックススイッチなる光制御デバイスを極めて微小な領域に構成することが可能となり、電子回路基板上に配置可能となり、よって、ボード内の光インタコネクション用光スイッチとして利用することができる。

【0053】

【発明の実施の形態】

本発明の実施の形態を以下に数例挙げて説明する。

【0054】

〔第一の実施の形態〕

本発明の第一の実施の形態を図1ないし図3に基づいて説明する。図1は本実施の形態の光制御素子1の構成例を示す原理的な平面図である。まず、基板2が設けられ、この基板2上に例えば3本の光導波路3, 4, 5が形成され、これらの光導波路3, 4, 5が光結合部品としての光偏向部6によって接続されている。ここでは、光導波路3が入射側とされ、出射側の光導波路4, 5同士は直交配置されている。もっとも、光導波路の本数は3本に限らず、4本以上でも良く、また、光偏向部6に対して入射側と出射側とに光導波路が必ずしも接続されている必要はなく、空間伝搬でも良い。

【0055】

光偏向部6には、周期的な屈折率（誘電率）分布を基板2上に形成することで作製されたフォトリック結晶構造7が構成されている。フォトリック結晶構造7は、周期構造を調整することで、光子の禁制体であるフォトリックバンドギャップを持たせることが可能である。フォトリック結晶の特性は、基板2と光原子の誘電率の差、その配置、光の波長と光原子の大きさ、光原子間の距離などによって決定される。そのため、これらのどれかを変化させれば、フォトリック結晶構造7の特性を変化させることができる。特に、フォトリックバンドギャップが存在するフォトリック結晶構造7に対して、光原子又は基板2の屈折率を変化させれば、フォトリックバンドを変化させることが可能となる。

【0056】

そのため、フォトリック結晶構造7の屈折率を変化させ、フォトリック結晶構造7の透過率を変化させることで、ある範囲の波長に対して屈折率変化前は光の

透過体であるのを、屈折率変化後は光の反射体に変化させることができる。

【0057】

この現象を利用するために、本実施の形態では、光偏向部6のフォトニック結晶構造7は屈折率が変化する構成になっている。このような屈折率の変化には、電気光学効果、熱光学効果、半導体薄膜のキャリアプラズマ効果、光カー効果などを用いる。これらの物理現象は構成される材料によって異なるが、屈折率が変化する材料でフォトニック結晶構造7が構成されている。

【0058】

この光偏向部6に関して、本実施の形態では、対角線に従い2つの領域8, 9に区分し、これらの領域8, 9を屈折率可変部分として電界印加、光照射などにより屈折率を個別に変化させることができるように構成されている。屈折率が変化することで、フォトニック結晶の反射率が変化するために、光の透過・反射を制御することができる。

【0059】

例えば、入射側の導波路3からフォトニック結晶構造6に対して透明な波長を持つ入射光が入射してきたとき、領域8, 9に屈折率変化を与えなければ、光の直進性により、光信号はフォトニック結晶構造6による光偏向部5を素通りして光導波路5に伝達していく。しかし、領域9の屈折率を変化させ、伝搬波長がフォトニックバンドギャップ内に入るとすると、光は反射して、直交配置された光導波路4側に伝搬していく。屈折率変化を与える構造を図1に示すようにプリズムミラー型にしておけば、高効率で光を反射させることができる。さらに、屈折率を変化させる部分は調整することが可能であるので、任意の方向に光の経路（進行方向）を変換させることができる。

【0060】

よって、基本的に、本実施の形態によれば、機械的にミラーをマイクロマシン技術によって可変することによりこのような経路変更を行う方式と比較して、機械移動でない点で、安定性に優れており、また、高速な経路変更も期待できる。

【0061】

また、本実施の形態のような光の反射は、光経路変換手段として特に有効であ

る。これは、光の損失を生じることなく、かつ、特定波長に対して光の進行方向を制御することができるからである。もっとも、このような例に限らず、この他、光変調手段、光波長選択手段、光信号時分割手段、パルス発生器としても用いることができる。

【0062】

また、単に屈折率可変部分を設けるのみではなく、LN基板やLT基板にKTP基板に対して、分極反転処理部分を設けた擬似位相整合構造を設け、非線形光学効果と組み合わせることも効果的である。非線形光学効果により生じた特定のSHG光や4光波混合光又は元の入力光のみを、微小領域において、選択的に反射又は透過により、光経路を変更することが可能である。擬似位相整合としては、通常の擬似位相整合以外に反結合擬似位相整合であってもよい。さらに、フォトニック結晶により群速度を低下させて実効的な非線形光学定数を増加させたりすることが効果的である。また、フォトニック結晶構造自体で位相速度を一致又は変化させて、擬似位相整合構造が不要な非線形屈折構造としたり、位相速度変化を考慮した擬似位相整合構造とさせたりすることも効果的である。

【0063】

また、フォトニック結晶の孔構造又は柱構造又は別途に基板に垂直に設けた溝構造により、電極による電圧印加やイオン拡散による分極反転処理において、その空隙を有する構造により分極反転処理部分が分離されるので、従来より微細なピッチの擬似位相整合構造を設けることができる。さらに、フォトニック結晶の孔構造又は柱構造又は別途に基板に垂直に設けた溝構造に設けた電極により電圧印加することで、電圧の印加される部分自体を分離することもできる。

【0064】

ところで、図1に示す例では、光偏向部5の全面にフォトニック結晶構造6が構成されているが、図1に示すように単純に光導波路4又は5なる2方向への分岐であれば、領域8部分にはフォトニック結晶構造6が構成されている必要はない。ただし、このときは領域9部分のフォトニック結晶構造6は斜めに切断されているのではなく、フォトニック結晶構造6に対して素直に光が入射できるように、反射させたい方向に入射面を傾けておく。例えば、三角格子であれば、格子

同士の配置角度が60度であるので、60度又は30度で反射させるか、図1に示すように45度で反射させる場合には、結晶自体を45度傾けて反射させる方法を取る。正方格子の場合も同様で、格子の配置角度が90度であるので、45度で反射させる場合には、フォトニック結晶の配置で実現可能であるが、任意の角度に対してはその角度に傾ける必要がある。

【0065】

また、図1では光導波路3, 4, 5として光ファイバを光が伝搬するように全反射型の光導波路を想定しているが、後述する実施の形態のようにフォトニック結晶構造6が形成されている光導波路でもよく、また、フォトニック結晶構造の一部に欠陥を導入した線欠陥導波路でもよい。

【0066】

ところで、本実施の形態のような光制御素子1の構成は、その一例として、以下のようにして実現できる。例えば、光の管内波長程度の厚みを持つ半導体薄膜に円孔をリソグラフィーとエッチングで構成すれば、屈折率3の半導体に2次元の空気円孔を構成できる。誘電率分布は必ずしも円形である必要は無く、方形、多角形でも良い。この半導体薄膜は量子井戸や歪量子井戸が形成されたInP基板、GaAs基板を選択エッチングすることにより、薄膜を空気に露出させることで形成できる。また、屈折率1.45のSiO₂上に形成された波長程度の厚みのSi薄膜をもつSOI (Silicon on insulator) 基板を用いても形成することができ、多くの論文で報告されている。特に、SOI基板は電子回路に用いられるために開発されたために、結晶品質やコストの面できわめて利用価値が高い。

【0067】

空気と半導体との全反射で上下方向に光は閉じ込められるが、薄膜面内では形成された2次元フォトニック結晶の特性が利用できる。このスラブ型2次元フォトニック結晶部に光導波路を接続することで、本実施の形態の光制御素子1の構造を形成することができる。

【0068】

また、このような構造をニオブ酸リチウムやニオブ酸チタン、KTP等の無機

結晶、若しくは PZT、PZLT 等のセラミックスによる薄膜構造を低屈折率媒質上に形成、若しくは空気境界となるエアブリッジ構造にし、薄膜にフォトニック結晶を形成しても実現することができる。さらには、ネマチックやスメクチック構造を有する液晶や、アゾ色素、スチルベンゼン色素、ダストなどの有機分子又は有機結晶薄膜を低誘電体層上に形成し、フォトニック結晶構造を構成しても可能である。もちろん 2 次元構造で形成してもよい。例えば、半導体ストライプを積層することで構成された 3 次元フォトニック結晶内に有機材の屈折率変化構造を導入することで構成することが可能である。

【0069】

ところで、本実施の形態の構成の光制御素子 1 の動作原理を計算機シミュレーションによって確認したので、図 2 を参照して以下にその結果を説明する。まず、屈折率が変わることによって、フォトニックバンドが変化する現象はフォトニックバンド解析によって確かめることができる。

【0070】

フォトニックバンドの解析手法の 1 つである平面波展開法で計算した結果を図 2 に示す。屈折率 3.5 の基板に、三角格子の円孔によるフォトニック結晶構造が構成され、その円孔内部に屈折率が 1.4 又は 1.6 の媒質を埋め込んだ構成例に対して解析を行ったものである。このような構成は半導体基板に液晶を充填することで実現できる。円孔間の距離ピッチ a に対して円孔の半径 r は、 $r = 0.9a$ で決定される値を用いた。

【0071】

ここでは、2 次元での解析とし、基板面内に電界が存在する電氣的横波 (Transverse Electric: TE) モードのフォトニックバンドを計算している。

【0072】

図 2 (a) が屈折率 1.4 に対するバンド図であり、図 2 (b) が屈折率 1.6 に対するバンド図である。網目で表した部分がフォトニックバンドギャップであり、2 次元面内のあらゆる方向の波数に対して、光伝搬が禁止されている領域である。図 2 (a) に比べて図 2 (b) は、このバンドギャップの位置が規格化周波数 (Normalized Frequency) の低い方向にシフトしている。つまり、規格化周波数 0

、35の光は屈折率1.4ではバンドギャップ内にあるために光は透過しないが、屈折率1.6ではバンドギャップから外れてしまうので、フォトリソグラフィによって決定された規格化周波数で光が透過する。これらのフォトリソグラフィによって、屈折率制御により光の透過率制御ができることがわかる。

【0073】

このような光制御素子1は、他例として、例えば半導体基板と液晶とを用いることにより構成できる。つまり、GaAsやSi基板にフォトリソグラフィとエッチングによって、光の波長であれば、1 μ m以下の微小円孔を作製し、作製された円孔部分に液晶を注入することで構成することができる。ネマチック液晶に代表される液晶の多くは電界印加により変化する屈折率異方性を示し、その屈折率差は0.2程度である。また、薄膜スラブ構造であれば、上下方向の光の閉じ込めも可能となるので、光がリークすることなく上述のような構成を実現することができる。薄膜スラブ構造としてはSOI基板を用いることができ、スラブ部分の厚みは1 μ m以下が好ましく、上下方向で単一モード伝搬する厚みであればより好ましい。そのため、このような構成をとることで円孔内の屈折率を変化させることが可能な光制御素子1を構成することができる。

【0074】

また、SOI基板上にSi円柱を形成し、周囲を液晶で埋める構成をとり、光導波路を有機材料で形成してもよい。これは高誘電率材料である円柱が低誘電率である液晶で囲まれている構成となるが、設計値を最適化することで、上述したような効果をもたせることができる。

【0075】

このような構成であれば、屈折率の低い光導波路が形成できるために、光ファイバなどとの結合システムを比較的容易に構成することが可能となる。

【0076】

このような光制御素子1は、さらに他例として、以下のように作製することができる。即ち、ニオブ酸リチウム(LN)のZ軸カット結晶基板の表面を、CF系ガスに対してメタルマスクを用いてドライエッチングする。これにより、1 μ mの深さの微細孔を有する基板表面を得る。この後、熱酸化シリコン膜付きシリ

コン基板と、この表面に微細孔を有するLN基板とを貼り合わせて、酸化物同士の接合を行う。この後、LN基板の裏面を機械研磨、CMP研磨又はイオン研磨して、LN基板の厚さを $1\mu\text{m}$ とし、微細孔を貫通させる。微細孔には、予めシリコン酸化物又はシリコン窒素膜又は高分子膜等を充填しておく、研磨による微細孔の破損が少なくなる。この後、レジストマスクを用いてシリコン酸化膜及び微細孔の充填物質をウェットエッチングにより部分的に除去することにより、エアギャップ・スラブ型LNフォトニック結晶を作製することができる。

【0077】

予めLNの微細孔付近の上下部分や、微細孔に電極を設けておくと、微小空間に強電解を印加することができ、より効果的である。さらに、シリコン上に電気駆動素子を設けておき、エレクトロフォレシスによりLN上の電極とシリコン上の電気駆動素子との電氣的接続を行い、複合基板による電気駆動素子一体型の光制御素子を作製することができる。

【0078】

ニオブ酸リチウムに代えて、ニオブ酸チタン、KTP、SBN (SrBaNb複合酸化物)、チタン酸バリウム等の無機結晶や高屈折率の有機材料若しくはPZT、PZLT、チタン酸バリウム等の無機セラミックスに対して、同様にドライエッチングにより微細孔を作製してもよい。また、シリコン基板に代えて、LN基板、MgOドープLN基板、GaAs基板、その他の基板を用いてもよい。

【0079】

さらに、これらのLNのフォトニック結晶の一部に、プロトン拡散又はチタン拡散による導波路を設けたり、ダイシングやドライエッチによるリッジ形又は埋め込み形導波路を作製してもよい。さらに、フォトニック結晶層や、多層に重ねられて、多層のスラブ導波路や3次元導波路であってもよい。

【0080】

また、LNやPZTの薄膜又はフォトニック結晶構造薄膜は、結晶を用いることに限定されるわけではなく、ゾルゲル法を用いた前駆体及びその前駆体のドライエッチングにより作製してもよい。

【0081】

また、シリコン上にドライエッチングにより形成した微細孔に液晶を充填してもよい。このとき、液晶の配向を基板に対して垂直な方向とし、横電界を印加することにより作製した、液晶フォトニック結晶を用いることも効果的である。さらには、単なる基板ではなく、LN基板のような電気光学効果を有する基板に液晶を部分的に充填して、複合的に電気光学効果を生じさせてもよい。

【0082】

ところで、光の透過率変化が起こる現象を確認するために、時間領域差分法(Finite Difference Time Domain (FDTD) Method)でシミュレーションを行った。前述したような平面波展開法でのモデルを基に、光の波長を $1.3\mu\text{m}$ 、円孔のピッチ a を $0.44\mu\text{m}$ 、円孔の半径 r を $0.198\mu\text{m}$ ($2r=0.9a$)とした。フォトニック結晶部分は10層とした。これは層厚 $4\mu\text{m}$ と極めて微細な層厚に相当する。 $\Gamma-X$ 方向に平面波を入射し、フォトニック結晶構造6の入射側と出射側での光のパワー比から算出した波長(Wavelength)に対する透過率(Transmittance)を図3に示す。波長 $1.3\mu\text{m}$ において、屈折率変調により透過率は35dB以上の変化が生じている。これは、透過と反射とを制御するのに十分な消光比であり、さらに消光比が30dB以上取れる波長範囲も50nmと広い。波長範囲が広ければ、半導体レーザー自身の発熱などにより変動しやすい発振波長の高精度な制御を必要としなくなる利点がある。フォトニック結晶構造6を利用すると、平面波ではなく波数の角度成分が大きいビームも、フォトニックバンドギャップにかかっていれば反射することが可能である。

【0083】

[第二の実施の形態]

本発明の第二の実施の形態を図4に基づいて説明する。図4は、本実施の形態の光制御素子11の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子11は、基板(図示せず)上に3本の光導波路12, 13, 14を例えば互いに120度の角度を持たせて形成し、これらの光導波路12, 13, 14の中心部に光結合部品としての光偏向部15が例えば正三角形状に形成されて設けられ、各々の光導波路12, 13, 14の一端が接続されている。ここに、各々の光導波路12, 13, 14の光偏向部15側の端部上には、その導波路幅にてフ

フォトニック結晶構造 16, 17, 18 が各々独立して屈折率を変化させることで透過率の制御が可能な屈折率可変部分として形成されている。

【0084】

なお、図示例では、光偏向部 15 に接続されている光導波路の本数は 3 本であるが、3 本に限らず、4 本以上の光導波路であってもよい。もっとも、光導波路 12, 13, 14 には幅があるので、多数接続すると、接続部分の面積が大きくなることに起因して回折により光が広がるために結合効率が低くなるので、4 本程度がより好ましい。また、光導波路 12, 13, 14 の幅は単一モードでもよいし、マルチモードに対応した幅でも良い。一般的に全反射を用いた光回路であると、マルチモードは扱いにくいですが、本実施の形態の場合、フォトニック結晶構造 16, 17, 18 をミラーとして用いているので、特定偏向に対してはあらゆる方向の波数に対して高い反射率を持たせることができる。

【0085】

[第三の実施の形態]

本発明の第三の実施の形態を図 5 に基づいて説明する。図 5 は、本実施の形態の光制御素子 21 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子 21 は、基板（図示せず）上に 4 本の光導波路 22～25 を例えば互いに直交する十字状に配置させて形成し、これらの光導波路 22～25 の中心部に光結合部品としての光偏向部 26 が例えば正形状（多角形状の一つ）に形成されて設けられ、各々の光導波路 22～25 の一端が接続されている。なお、光導波路の本数としては、図示例の 4 本に限らず、5 本以上であってもよい。もっとも、第二の実施の形態の場合と同様に、多数の光導波路が接続されていると、接続部分の面積が大きくなるために、回折の影響で光が広がってしまい、損失の原因になるので、4 本程度がより好ましい。

【0086】

また、光偏向部 26 には、周期的な屈折率（誘電率）分布を基板上に形成することで作製されたフォトニック結晶構造 27 が構成されている。さらに、この光偏向部 26 は 2 本の対角線に従い直角 2 等辺三角形の 4 つの領域 28～31 に区分され、各々の領域 28～31 が各々個別に屈折率を変化させてフォトニック

結晶ミラーを構成可能な屈折率変化部分とされている。

【0087】

つまり、本実施の形態の光制御素子 21 において、何れの領域 28～31 に関してもその屈折率を変化させなければ、光導波路 22 から入射した光は光の直進性から光導波路 24 から出力される。一方、領域 30, 31 の屈折率を変化させ、光の透過率を変化させれば、本実施の形態ではプリズム形状の反射体（フォトリック結晶ミラー）となるので、光導波路 22 から入射した光は、光偏向部 26 の領域 30, 31 の界面で反射されて、光導波路 23 から出射される。

【0088】

同様に、領域 29, 30 の屈折率を変化させれば、光は光導波路 25 から出射される。

【0089】

このように、屈折率を変化させる領域 28～31 の組み合わせにより、光導波路 22 からの光の進行方向を任意方向に向けて偏向させることができる。

【0090】

[第四の実施の形態]

本発明の第四の実施の形態を図 6 に基づいて説明する。図 6 は、本実施の形態の光制御素子 41 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子 41 は、基板（図示せず）上に 4 本の光導波路 42～45 を例えば互いに直交する十字状に配置させて形成し、これらの光導波路 42～45 の中心部に光結合部品としての光偏向部 46 が例えば正形状（多角形状の一つ）に形成されて設けられ、各々の光導波路 42～45 の一端が接続されている。

【0091】

また、光導波路 42～45 の光偏向部 46 側の端部、及び、光偏向部 46 には、フォトリック結晶構造 47～51 が各々構成されている。さらに、この光偏向部 46 は 2 本の対角線に従い直角 2 等辺三角形の 4 つの領域 52～55 に区分されている。これらの各々の領域 52～55 及びフォトリック結晶構造 48～51 部分が各々個別に屈折率を変化させることが可能な屈折率変化部分とされている。例えば、電気光学材料による電気光学効果を用いる場合であれば、電極を独

立に構成すれば、電界を独立に印加することが可能となる。また、熱光学効果を用いるのであれば、ヒータを個別につけることで可能となる。

【0092】

これらの屈折率可変部（領域 5 2 ～ 5 5、フォトニック結晶構造 4 8 ～ 5 1 部分）の屈折率変化の組み合わせにより光を任意の方向に伝搬させることが可能となる。

【0093】

例えば、屈折率可変部（フォトニック結晶構造 4 9， 5 1 部分）の屈折率を変化させることで、光導波路 4 2 から入射した光信号が直進し、光導波路 4 4 から出射される。光の直進性からすると、屈折率可変部（フォトニック結晶構造 4 9， 5 1 部分）の屈折率を変化させなくても、光が光導波路 4 4 から出射されるが、回折により光導波路 4 3， 4 5 に漏れてしまう光を屈折率可変部（フォトニック結晶構造 4 9， 5 1 部分）により抑制できる効果があり、光伝搬損失を低下させる。即ち、結合効率を上げるために屈折率可変部（フォトニック結晶構造 4 9， 5 1 部分）を設けることが本実施の形態の特徴である。

【0094】

また、屈折率可変部（フォトニック結晶構造 4 9， 5 0 部分）の屈折率を変化させれば、光導波路 4 2 からの光を光導波路 4 5 に偏向させることが可能であるが、4 本以上の光導波路が接続された構成の場合、逆進などの影響で光が高効率に光導波路 4 5 に結合できなくなる。そこで、屈折率可変部（領域 5 3， 5 4）の屈折率を変化させれば、プリズム形状の反射により、光は光導波路 4 5 に高効率で入射させることが可能である。

【0095】

つまり、本実施の形態では、第二、第三の実施の形態を組み合わせることで、高効率に光を任意の方向に高効率に結合することを可能としたものである。

【0096】

[第五の実施の形態]

本発明の第五の実施の形態を図 7 に基づいて説明する。図 7 は、本実施の形態の光制御素子 6 1 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御

素子 61 は、基板（図示せず）上に 4 本の光導波路 62～65 を例えば互いに直交する十字状に配置させて形成し、これらの光導波路 62～65 の中心部に光結合部品としての光偏向部 66 が例えば正形状（多角形状の一つ）に形成されて設けられ、各々の光導波路 62～65 の一端が接続されている。なお、光導波路の本数としては、図示例の 4 本に限らず、5 本以上であってもよい。もっとも、第二の実施の形態の場合と同様に、多数の光導波路が接続されていると、接続部分の面積が大きくなるために、回折の影響で光が広がってしまい、損失の原因になるので、4 本程度がより好ましい。

【0097】

また、光偏向部 66 には、周期的な屈折率（誘電率）分布を基板上に形成することで作製されたフォトニック結晶構造 67 が構成されている。さらに、この光偏向部 66 は 2 本の対角線に従い直角 2 等辺三角形の 4 つの領域 68～71 に区分され、各々の領域 68～71 が各々個別に屈折率を変化させてその透過率を制御し得る屈折率変化部分とされている。

【0098】

このような構成において、例えば屈折率変化により領域 70 部分の反射率のみを変化させると、光導波路 62 と光偏向部 66 の結合部分で T 字型分岐を構成することになり、光導波路 62 からの光を光導波路 63, 65 に向けて分岐が可能となる。

【0099】

このような形状は単一モード導波路では全反射を用いて、低損失な分岐が構成されている (IEEE Lightwave Technol. Vol. 17, p. 1682, 1999)。しかし、マルチモード導波路では高次モードで全反射による高効率の反射は困難であり、大きな損失の原因となる。この点、本実施の形態のように、反射鏡としてフォトニック結晶配列を用いることができれば、高次モードでも大きな反射率を得ることが可能となり、高効率の分岐が可能となる。

【0100】

[第六の実施の形態]

本発明の第六の実施の形態を図 8 及び図 9 に基づいて説明する。図 8 は、本実

施の形態の光制御素子 81 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子 81 は、基板（図示せず）上に 3 本の光導波路 82 ～ 84 を例えば互いに 120 度の角度を持たせて形成し、これらの光導波路 82 ～ 84 の中心部に光結合部品としての光偏向部 85 が例えば正三角形状に形成されて設けられ、各々の光導波路 82 ～ 84 の一端が接続されている。ここに、各々の光導波路 82 ～ 84 の光偏向部 85 側の端部上には、その導波路幅にて 2 種類以上のフォトリック結晶構造 86 ～ 88、89 ～ 91 が各々独立して屈折率を変化させることが可能な屈折率可変部分として形成されている。

【0101】

即ち、フォトリック結晶構造 86 ～ 88 とフォトリック結晶構造 89 ～ 91 とは、異なる配列や周期構造で構成されている。つまり、フォトリック結晶構造 86 ～ 88 側は電氣的横波 (Transverse Electric: TE) に対して反射率が変化可能である構造であり、フォトリック結晶構造 89 ～ 91 側は磁氣的横波 (Transverse Magnetic: TM) に対して反射率が変化可能である構造である。

【0102】

なお、図示例では、光偏向部 15 に接続されている光導波路の本数は 3 本であるが、3 本に限らず、4 本以上の光導波路であってもよい。もっとも、光導波路 12, 13, 14 には幅があるので、多数接続すると、接続部分の面積が大きくなることに起因して回折により光が広がるために結合効率が低くなるので、4 本程度がより好ましい。

【0103】

このような構成において、フォトリック結晶配列は基本的には TE, TM に対する偏光依存性が大きい性質を持つ。光原子の配列によっては TE, TM 両偏光に対してバンドギャップを持たせることは可能であるが、その制約条件は狭く、周期構造の屈折率差が小さいと TE, TM 両偏光に対するバンドギャップが開く構造を設計することはできない。この点、本実施の形態では、無理に TE, TM 両偏光に対してバンドギャップを持つ構造をもたせるのではなく、片方の偏光に対してバンドギャップを持たせるようにしたものである。これにより、設計許容誤差が大きくなる。また、この反射率制御を片方の反射層にだけ行くと、偏光を

分離できる構成となる。

【0104】

例えば、フォトニック結晶構造 86, 89 には屈折率変化を与えず TE, TM 両偏光を透過させ、フォトニック結晶構造 91 に屈折率変化を与えることで TE 偏光を抑制し、フォトニック結晶構造 87 に屈折率変化を与えることで TM 偏光を抑制すると、光導波路 84 には TM 偏光が、光導波路 83 には TE 偏光の光信号が伝搬するように、TM 偏光と TE 偏光とを分離させることが可能である。よって、光制御素子 81 としての偏光依存性を解消でき、微小な領域でのボード内光インタコネクション用光スイッチを実現することが可能となる。

【0105】

ところで、図 9 に TE 偏光及び TM 偏光に対するフォトニックバンド図を示す。基板屈折率が 2.2、空気円孔の三角格子でフォトニック結晶が構成され、半径 r とピッチ a の比率は $r = 0.8a$ である。また、図 2 の場合と同様に平面波展開法で計算した。この構成であると、任意方向の波数ベクトルに対して TE 偏光ではフォトニックバンドギャップが存在しているが、TM 偏光に対しては特定方向の波数ベクトルのみにフォトニックバンドギャップが存在する。例えば、図 9 において、規格化周波数 0.4 に対応した光を入射すると TM 偏光の光は透過するが、TE 偏光の光は透過しないことになる。この現象を利用することで偏光分離素子を構成することができる。

【0106】

なお、本実施の形態においても、フォトニック結晶構造 87, 90 の屈折率又はフォトニック結晶構造 88, 91 の屈折率を同時に変化させることで、その透過率を変化させることもできる。

【0107】

[第七の実施の形態]

本発明の第七の実施の形態を図 10 ないし図 12 に基づいて説明する。図 10 は、本実施の形態の光制御素子 101 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子 101 は、基板（図示せず）上に 3 本の光導波路 102 ~ 104 を例えば互いに 120 度の角度を持たせて形成し、これらの光導波路 1

02～104の中心部に光結合部品としての光偏向部105が例えば正三角形に形成されて設けられ、各々の光導波路102～104の一端が接続されている。ここに、各々の光導波路102～104の光偏向部105側の端部上には、その導波路幅にてフォトニック結晶構造106～108が各々独立して屈折率を変化させることが可能な屈折率可変部分として形成されている。

【0108】

ここに、本実施の形態のフォトニック結晶構造106～108は、例えば図11(a)に示すようなフォトニック結晶層とされ、光原子109で構成されたフォトニック結晶に欠陥部分110を組み込むことで共振器構造を形成している。フォトニック結晶の層数は期待する反射率によって異なる。欠陥部分110は点欠陥でもよく、欠陥の個数も特性によって選択できる。この欠陥部分110によりフォトニックバンドギャップ内で特定の波長を持つ光だけが、透過することが可能となる。

【0109】

本実施の形態のような構造によると、屈折率変化によるフォトニックバンドの移動を使う必要がなく、共振モードを用いるので、わずかなバンドの変化でスイッチングが可能となる。つまり、特定の波長に限定すれば、電気光学材料で屈折率変化が0.01以下の材料でも反射率制御（透過率制御）が可能となる。

【0110】

図12は1列欠損の波長に対する透過率の変化を示したシミュレーション結果を示す特性図である。本例は、円孔三角配列のフォトニック結晶であり、ピッチ $a = 400 \text{ nm}$ 、半径 $r = 320 \text{ nm}$ ($r = 0.80a$)である。また、基板の屈折率は2.2とし、円孔部分の屈折率を1.0とした。

【0111】

TEモードに対して、 $\Gamma-X$ 方向に波長 850 nm にピークを持つパルスを入射して、FDTD計算によりシミュレーションした。また、屈折率を1%変化させたときの結果も同時に示す。屈折率1%の変化で波長変化は 5 nm 程度である。消光比はフォトニック結晶層の層数によって変化し、6層で消光比が 25 dB 以上取れる。つまり、 $2 \mu\text{m}$ の層厚で光の透過反射を制御できる。また、層数を

増やすことで、消光比を増大できる。

【0112】

このような屈折率変化を起こす材料としては、二オブ酸リチウム、PZLT、セラミック、有機材料といった電気光学材料がある。また、半導体量子井戸を用いたキャリアプラズマ効果を用いても1%の屈折率変化を起こすことは可能である。これらの欠陥部分は、均一で多重に設けることにより、透過率プロファイルを制御することができる。

【0113】

何れにしても、共振器部分の間隔を制御した複数のフォトニック結晶共振器を構成することで、共振ピークの平坦化を可能とする。具体的には、線欠陥部分を3つ設け、中央の線欠陥間隔を他の0.5~0.8倍にすることにより、多重不均一線欠陥構造のLNがある。従来の、単なる1つの線欠陥部分の場合には、最大透過率波長から0.5nmシフトした場合には、50%以下の透過率となってしまう。これに対し、多重不均一線欠陥構造の場合には、最大透過率波長から0.5nmシフトしても、98%以上の透過率を有することが実現できる。

【0114】

なお、共振器部分の間隔は図11(b)に示すようにフォトニック結晶構造における欠陥部分110部分の間隔を変化させてもよいし、図11(c)に示すように欠陥部分110部分に近接する光原子109の大きさを変化させてもよい。

【0115】

これにより、例えば半導体レーザからの光源のわずかな波長振れ（発振波長の揺らぎ）によって、共振器部分での反射率の急激な変化によるスイッチング特性の劣化を抑制することが可能であり、波長に対する許容範囲を広げた光スイッチや光変調器を構成することが可能である。

【0116】

〔第八の実施の形態〕

本発明の第八の実施の形態を図13に基づいて説明する。図13は、本実施の形態の光制御素子111の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子111は、基板（図示せず）上に十字状の光導波路112~115が

形成され、これらの光導波路 112～115 の交差部分を光結合部品としてフォトニック結晶構造 116 が一方の対角線方向に形成されている。このフォトニック結晶構造 116 は 2 列以上の欠陥部分 117 が存在するフォトニック結晶配列として形成されている。この場合、欠陥部分 117 を中心に対称配列とされ、少なくとも 2 層で同じ層数を有するフォトニック結晶配列とされ、2 次元面内での多モード光導波路にも接続できる構造とされている。ここで、「列」とはフォトニック結晶に光が垂直に入射する場合に、入射面に面しているフォトニック結晶のことであり、「層」とは光の進行方向に配列しているフォトニック結晶を示す。つまり、図 13 に示す例では、フォトニック結晶構造 116 は対角線方向に 45 度傾いているが、7 層で 4 層目が欠陥部分 117 である構造であり、1 層目は 20 列ある構造例を示している。

【0117】

このようなフォトニック結晶構造 116 は入出射側の光導波路 112～115 の配置に対して、傾けて配置されている。

【0118】

このような構成において、欠陥部分 117 による共振モードにより選択される特定の波長で入射した光信号は、屈折率変化前ではフォトニック結晶構造 116 を透過し、光導波路 114 へ伝搬していくが、屈折率変化により共振モードの波長が変化すると透過率が下がるため、フォトニック結晶構造 116 部分で反射され、光導波路 115 側に光路変更する。

【0119】

ここに、フォトニック結晶構造 116 は少なくとも 2 層のフォトニック結晶配列があればよいが、例えば、図示例のように欠陥部分 117 を斜めに形成した場合には、欠陥部分 117 に対して垂直方向の層数は、欠陥部分 117 の形成方法により異なる可能性があるものの、本実施の形態のように、欠陥部分 117 に対して垂直方向の層数を同じとすることにより、光の入出射面からのフォトニック結晶層数が均等となり、より効率よく光の経路を変更させることができる。

【0120】

また、フォトニック結晶構造 116 の層数としては、フォトニック結晶がミラ

ーとして機能する層であり、この層数が多すぎると欠陥部分 117 まで光が到達せずに反射されてしまい、欠陥部分 117 を持たせることによる効果が期待できなくなってしまうが、シミュレーション結果によれば、6 層のフォトニック結晶で挟むことで垂直入射では十分に欠陥部分 117 を持たせることによる効果が現れることが確認できたものである。また、1 層増減させただけでも、共振器の性質が大きく変わってしまう。このような点を考察すると、フォトニック結晶構造 116 の層数としては、10 層以上では欠陥部分 117 を持たせることによる効果が期待できない可能性があるので、10 層以下とすることが望ましい。

【0121】

また、本実施の形態の場合、フォトニック結晶構造 116 の欠陥部分 117 の直線方向に直交する方向以外にフォトニック結晶を伝播して欠陥部分 117 に入射する伝播波の伝播波数ベクトル成分を有する構造とされており、2 次元面内で形成されたフォトニック結晶構造 116 の欠陥部分 117 に対して傾いている波数を持つ光を入射しても、光の透過率を制御することができる。もっとも、この点は、欠陥部分 117 を有するフォトニック結晶構造 116 の場合への適用例として、入射光が単一波数である平面波が入射する場合の想定例に限らず、ビームのように波数分布を持つ入射光に対しても適用可能である。また、単に光の透過・反射を制御するだけでなく、入射側の光導波路から斜め方向に入射した光を、別の出射側の光導波路に経路変更させることも可能となる。

【0122】

なお、光が光導波路 112 側から光導波路 114 側へ伝搬するときには、光導波路 115 側に漏れないように、図 6 に示した場合のように光導波路 115 上にフォトニック結晶構造による反射体を設置しても良い。また、光導波路の配置角度は図 13 に示すように 90 度である必要はなく、90 度以上の角度にすることも可能である。さらに、特定の波長のみを透過する構造であるので、波長フィルタとしても用いることができる。

【0123】

[第九の実施の形態]

本発明の第九の実施の形態を図 14 に基づいて説明する。本実施の形態は光制

御デバイス 121 への適用例を示し、図 14 はこの光制御デバイス 121 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御デバイス 121 は、基板（図示せず）上に 2 次元アレイ状に形成された $N \times N$ 本の光導波路 122, 123 と、これらの光導波路 122, 123 の交差部分に各々配設されて対応する光導波路 122, 123 が接続された N^2 個の光結合部品 124 とを備える $N \times N$ のマトリックススイッチとして構成され、各々の光結合部品 124 が前述した各実施の形態の光制御素子 1, 11, 21, 41, 61, 81, 101 等の如くフォトリック結晶構造による屈折率可変部分を含む構成の光スイッチ構成とされている。

【0124】

従って、光結合部品 124 部分の屈折率を適宜変化させて光の進行方向を制御することにより、 $N \times N$ マトリックススイッチを構成して任意の光導波路に光路変換させて光を伝達させることができる。図示例では、薄く網掛けを施して示す光結合部品 124 部分を光が透過進行するように各部の光結合部品 124 部分の屈折率を変化させることで、矢印で示す方向に光が伝達される様子を示している。

【0125】

また、本実施の形態によれば、 $N \times N$ マトリックススイッチを極めて微小な領域に構成することが可能である。例えば、 $10 \mu\text{m}$ 幅の光導波路を $40 \mu\text{m}$ ピッチで配置したとき、 20×20 のマトリックススイッチを 1mm 角に配置することが可能である。屈折率変化を電力印加により起こす構造であれば、電極を配置する必要があるが、 5mm 角もあれば、光スイッチを構成することができる。そして、この程度の大きさであれば、光スイッチを電子回路基板上に配置することができ、ボード内の光インタコネクション用光スイッチとして利用することもできる。

【0126】

[第十の実施の形態]

本発明の第十の実施の形態を図 15 に基づいて説明する。図 15 は、本実施の形態の光制御素子 131 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の

光制御素子 131 は、基板（図示せず）上にフォトニック結晶構造 132 が形成され、このフォトニック結晶構造 132 の結晶配列中に複数本のフォトニック結晶線欠陥導波路 133 が交差するように形成されている。このようなフォトニック結晶線欠陥導波路 133 を交差させた光結合部分 134 で光が共振する現象が、フォトニック結晶特有の現象である。このような構造は、Q 値が極めて高く取れる可能性があり、交差部分に光子を捕捉することが可能となる。そこで、交差部分を含む部分 135 を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させることで、この共振状態を制御することが可能であり、光子の捕捉と開放とが可能となる光スイッチ、光信号遅延素子、光フィルタ等を構成することができる。この状態の変化は極めて敏感であるため、わずかな屈折率変化で状態が変化する。

【0127】

[第十一の実施の形態]

本発明の第十一の実施の形態を図 16 に基づいて説明する。図 16 は、本実施の形態の光制御素子 141 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御素子 141 は、基板（図示せず）上にフォトニック結晶構造 142 が形成され、このフォトニック結晶構造 142 の結晶配列中に十字状のフォトニック結晶線欠陥導波路 143 が交差するように形成されている。このようなフォトニック結晶線欠陥導波路 143 により分離された 4 箇所のフォトニック結晶構造 142 部分は各々対角線に従い 2 つの領域に区分され、全体で 8 箇所の屈折率可変部分 144～151 として個別に屈折率を変化させることが可能とされている。

【0128】

本実施の形態の光制御素子 141 では、フォトニック結晶線欠陥導波路 143 を交差させた部分 152 で光が共振する現象を利用するものである。そして、屈折率可変部分 144～151 として分離し、これらの屈折率可変部分 144～151 に関して個別に屈折率を変化させることで、光のスイッチング方向を制御することが可能となる。このように共振状態を制御することが可能であり、光子の捕捉と開放とが可能となる光スイッチ、光信号遅延素子、光フィルタ等を構成することができる。

【0129】

〔第十二の実施の形態〕

本発明の第十二の実施の形態を図 17 に基づいて説明する。本実施の形態は光制御デバイス 161 への適用例を示し、図 17 はこの光制御デバイス 161 の構成例を示す原理的な平面図である。本実施の形態の光制御デバイス 161 は、基板（図示せず）全面にフォトニック結晶構造 162 が結晶配列として形成され、かつ、このフォトニック結晶構造 162 の結晶配列中に 2 次元で $N \times N \times N$ 本のフォトニック結晶線欠陥導波路 163 が縦方向、右斜め方向及び左斜め方向に形成されている。そして、これらのフォトニック結晶線欠陥導波路 163 が交差する光結合部分 164 が各々屈折率変化部分を含む光制御素子 131, 141 の場合と同様に構成されている。

【0130】

このような構成において、フォトニック結晶線欠陥導波路 163 の交差部分（光結合部分 164）が屈折率変化部分として構成されており、各々の屈折率を個別に可変制御すれば、共振状態が変化するので、マトリックススイッチ構成することができ、任意の光導波路に光路変換させることができる。

【0131】

即ち、前述の実施の形態を複数組み合わせることで構成されるマトリックススイッチ、光素子アレイ、光遅延素子アレイの例を示しており、例えば、屈折率を変化させなければ、交差部分を直進する光信号が、ある時点で交差部分の屈折率を変化させることにより、その交差部分に捕捉することが可能となる。さらに、その屈折率変化を交差部分の一部に与えることにより、光の透過しやすさが変化するので、本来進むべき方向と異なる方向に光を進めることができるようになると考えられる。このような現象を利用することにより、任意のフォトニック結晶線欠陥導波路 163 に光を伝達することが可能となる。

【0132】

【発明の効果】

請求項 1 記載の発明の光制御素子によれば、基板と、この基板上にフォトニック結晶構造により形成された光結合部品と、前記フォトニック結晶構造の一部に設けられて前記光結合部品を少なくとも 2 つの領域に区分する屈折率可変部分と

、を備え、前記屈折率可変部分の屈折率を変化させることで区分される前記領域の界面で少なくとも 1 つの波数に対して反射作用を呈して光の進行方向を変化させるようにしたので、光の進行方向を変化させるために機械的な物体移動を利用しないことから、消光比が大きくて高速で安定した光経路変換器等の光制御素子を構成でき、また、光の進行方向の変化に反射作用を利用しているので、複雑な光の干渉系や光回路の構成をとることなく、光スイッチ等の光制御素子を構成することができる。

【0 1 3 3】

請求項 2 記載の発明の光制御素子によれば、請求項 1 記載の発明に加えて、光信号の経路変換器を光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積にて実現することができ、さらには、フォトニック結晶のバンドギャップを利用することで、角度成分を持つビーム上の光を高効率で反射させることができるため、単一モードの導波路である必要はなく、多モードの導波路でも光導波路を構成することができる。

【0 1 3 4】

請求項 3 記載の発明の光制御素子によれば、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させて当該フォトニック結晶構造に対応する光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにしたので、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供することができる。

【0 1 3 5】

請求項 4 記載の発明の光制御素子によれば、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を変化させて光導波路からの光の進行方向を偏向させることで、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供することができる。

【0 1 3 6】

請求項 5 記載の発明の光制御素子によれば、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を独立して変化させて光導波路からの光の進行方向を偏向させるようにしたので、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光

比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供することができる。

【0137】

請求項6記載の発明の光制御素子によれば、フォトニック結晶構造部分を屈折率変化部分としてその屈折率を独立して変化させて光導波路からの光を分岐させるようにしたので、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供することができる。

【0138】

請求項7記載の発明の光制御素子によれば、光導波路上に少なくとも2種類のフォトニック結晶構造を持たせて屈折率可変部分とし、その屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで電氣的横波と磁氣的横波とを分離させるようにしたので、フォトニック結晶の偏光特性から生ずる当該光制御素子の偏光依存性を解消することができ、偏光特性から生ずる設計の許容範囲を拡大することができる。

【0139】

請求項8記載の発明の光制御素子によれば、光導波路上に少なくとも2種類のフォトニック結晶構造を持たせて屈折率可変部分とし、その屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることで光導波路を伝送する光の透過率を変化させるようにしたので、光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積で、消光比が大きくて高速で安定した動作が可能な光制御素子を提供することができる。

【0140】

請求項9記載の発明によれば、請求項2ないし8の何れか一記載の光制御素子において、フォトニック結晶構造は、欠陥部分を有するので、例えば0.01以下の微小な屈折率変化で光信号の透過率を制御することができる。

【0141】

請求項10記載の発明によれば、請求項9記載の発明に加えて、フォトニック結晶全体又は特定領域全体の屈折率変化を生じさせる方法以外に、欠陥部分のみの屈折率変化を生じさせることができ、よって、屈折率を変化させる部分が小さくてよいので、電圧印加により屈折率を変化する場合には作製電極面積を小さくできると同時に、消費電力を小さくすることができ、また、光照射により屈折率

を変化する場合においても、その光照射部分を小さくすることにより、必要光出力や消費電力を大きく低減することができる。

【0142】

請求項11記載の発明によれば、請求項9記載の発明に加えて、欠陥部分からの層数を同じにすることで、光の入出射面からのフォトニック結晶層数が均等になるために、より効率よく光の経路を変更できる。

【0143】

請求項12記載の発明によれば、請求項10又は11記載の発明に加えて、欠陥部分を挟むフォトニック結晶の層数を制御することで、欠陥部分での共振器特性を変化させ、光の透過率を保ちながら屈折率変化により光を偏向させることができる。

【0144】

請求項13記載の発明によれば、請求項10ないし12記載の発明に加えて、2次元面内で形成されたフォトニック結晶構造の欠陥部分に対して傾いている波数を持つ光を入射しても、光の透過率を制御することができ、斜めに入射した光に対する偏向光の制御を可能にすることができる。

【0145】

請求項14記載の発明によれば、請求項3、9ないし13の何れか一記載の光制御素子において、等価波長帯域幅を広げることも可能となり、例えば、半導体レーザの発振波長の揺らぎに対する許容範囲を広げた光スイッチや光変調器等の光制御素子を構成することができる。

【0146】

請求項15記載の発明の光制御素子によれば、フォトニック結晶線欠陥導波路が交差した光結合部分に設定された屈折率可変部分の屈折率を変化させることで、光結合部分の共振状態を制御させることにより、光信号の捕捉と開放とが可能となる光スイッチ、光信号遅延素子、光フィルタ等の光制御素子を構成することができる。

【0147】

請求項16記載の発明の光制御素子によれば、フォトニック結晶線欠陥導波路

により分離されたフォトニック結晶部分に各々設定された屈折率可変部分の屈折率を独立して変化させることにより、光信号の捕捉と開放とが可能となる光スイッチ、光信号遅延素子、光フィルタ等の光制御素子を構成することができる。

【0148】

請求項17記載の発明の光制御デバイスによれば、 $N \times N$ マトリックススイッチなる光制御デバイスを極めて微小な領域に構成することが可能となり、電子回路基板上に配置可能となり、よって、ボード内の光インタコネクション用光スイッチとして利用することができる。

【0149】

請求項18記載の発明の光制御デバイスによれば、2次元に交差させて形成された $N \times N \times N$ 本のフォトニック結晶線欠陥導波路によるマトリックススイッチなる光制御デバイスを極めて微小な領域に構成することが可能となり、電子回路基板上に配置可能となり、よって、ボード内の光インタコネクション用光スイッチとして利用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明の第一の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図2】

(a)は屈折率1.4に対するバンド図、(b)は屈折率1.6に対するバンド図である。

【図3】

波長に対する透過率を示す特性図である。

【図4】

本発明の第二の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図5】

本発明の第三の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 6】

本発明の第四の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 7】

本発明の第五の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 8】

本発明の第六の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 9】

T E 偏光及び T M 偏光に対するフォトリックバンド図である。

【図 1 0】

本発明の第七の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 1 1】

その欠陥構造例を示す平面図である。

【図 1 2】

1 列欠損の波長に対する透過率の変化を示したシミュレーション結果を示す特性図である。

【図 1 3】

本発明の第八の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 1 4】

本発明の第九の実施の形態の光制御デバイスの構成例を示す原理的な平面図である。

【図 1 5】

本発明の第十の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 1 6】

本発明の第十一の実施の形態の光制御素子の構成例を示す原理的な平面図である。

【図 1 7】

本発明の第十二の実施の形態の光制御デバイスの構成例を示す原理的な平面図である。

【図 1 8】

従来例を示す平面図である。

【符号の説明】

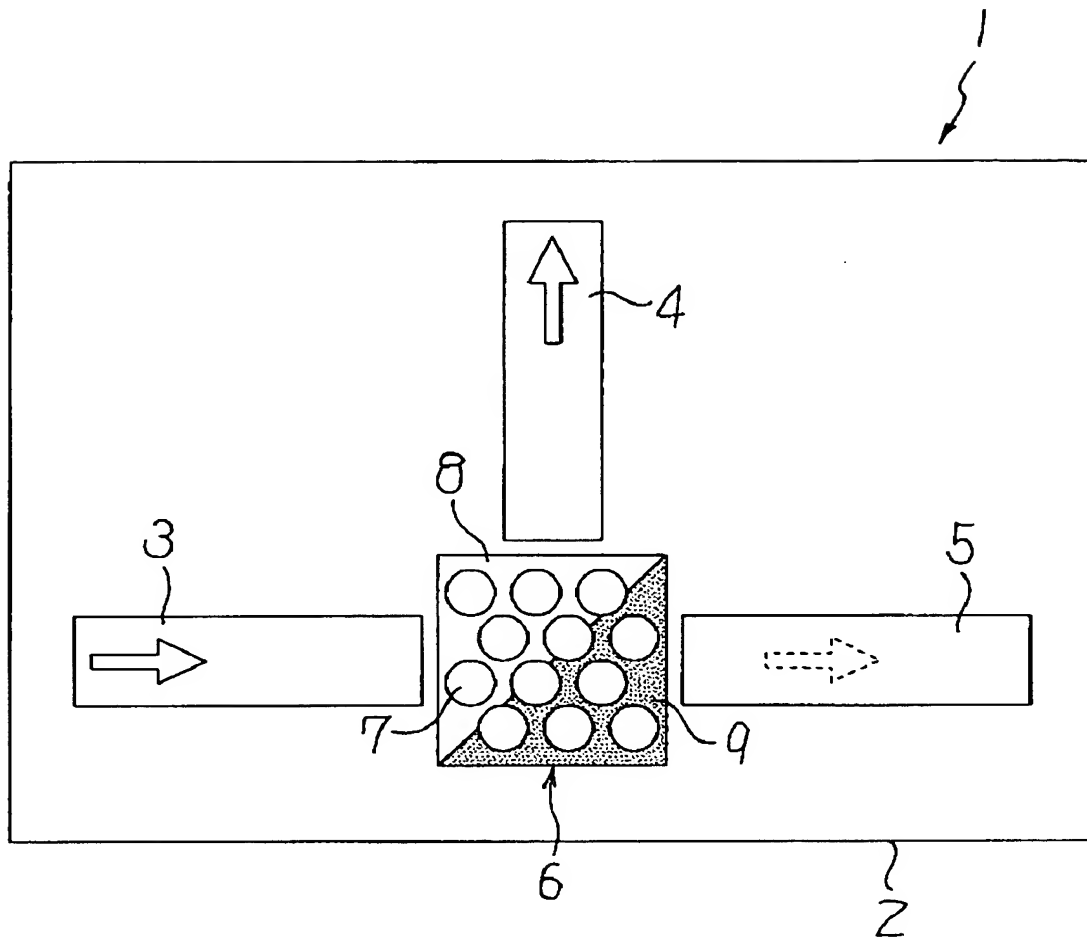
- 1 光制御素子
- 2 基板
- 3 ～ 5 光導波路
- 6 光結合部品
- 7 フォトニック結晶構造
- 8, 9 領域
- 1 1 光制御素子
- 1 2 ～ 1 4 光導波路
- 1 5 光結合部品
- 1 6 ～ 1 8 フォトニック結晶構造
- 2 1 光制御素子
- 2 2 ～ 2 5 光導波路
- 2 6 光結合部品
- 2 7 フォトニック結晶構造
- 2 8 ～ 3 1 領域
- 4 1 光制御素子
- 4 2 ～ 4 5 光導波路
- 4 6 光結合部品
- 4 7 ～ 5 1 フォトニック結晶構造
- 5 2 ～ 5 5 領域
- 6 1 光制御素子

6 2 ~ 6 5 光導波路
6 6 光結合部品
6 7 フォトニック結晶構造
6 8 ~ 7 1 領域
8 1 光制御素子
8 2 ~ 8 4 光導波路
8 5 光結合部品
8 6 ~ 9 1 フォトニック結晶構造
1 0 1 光制御素子
1 0 2 ~ 1 0 4 光導波路
1 0 5 光結合部品
1 0 6 ~ 1 0 8 フォトニック結晶構造
1 1 0 欠陥部分
1 1 1 光制御素子
1 1 2 ~ 1 1 5 光導波路
1 1 6 フォトニック結晶構造
1 1 7 欠陥部分
1 2 4 光結合部品
1 3 1 光制御素子
1 3 2 フォトニック結晶構造
1 3 3 フォトニック結晶線欠陥導波路
1 3 4 光結合部品
1 3 5 部分
1 4 1 光制御素子
1 4 2 フォトニック結晶構造
1 4 3 フォトニック結晶線欠陥導波路
1 4 4 ~ 1 5 1 屈折率可変部分
1 5 2 部分
1 6 2 フォトニック結晶構造

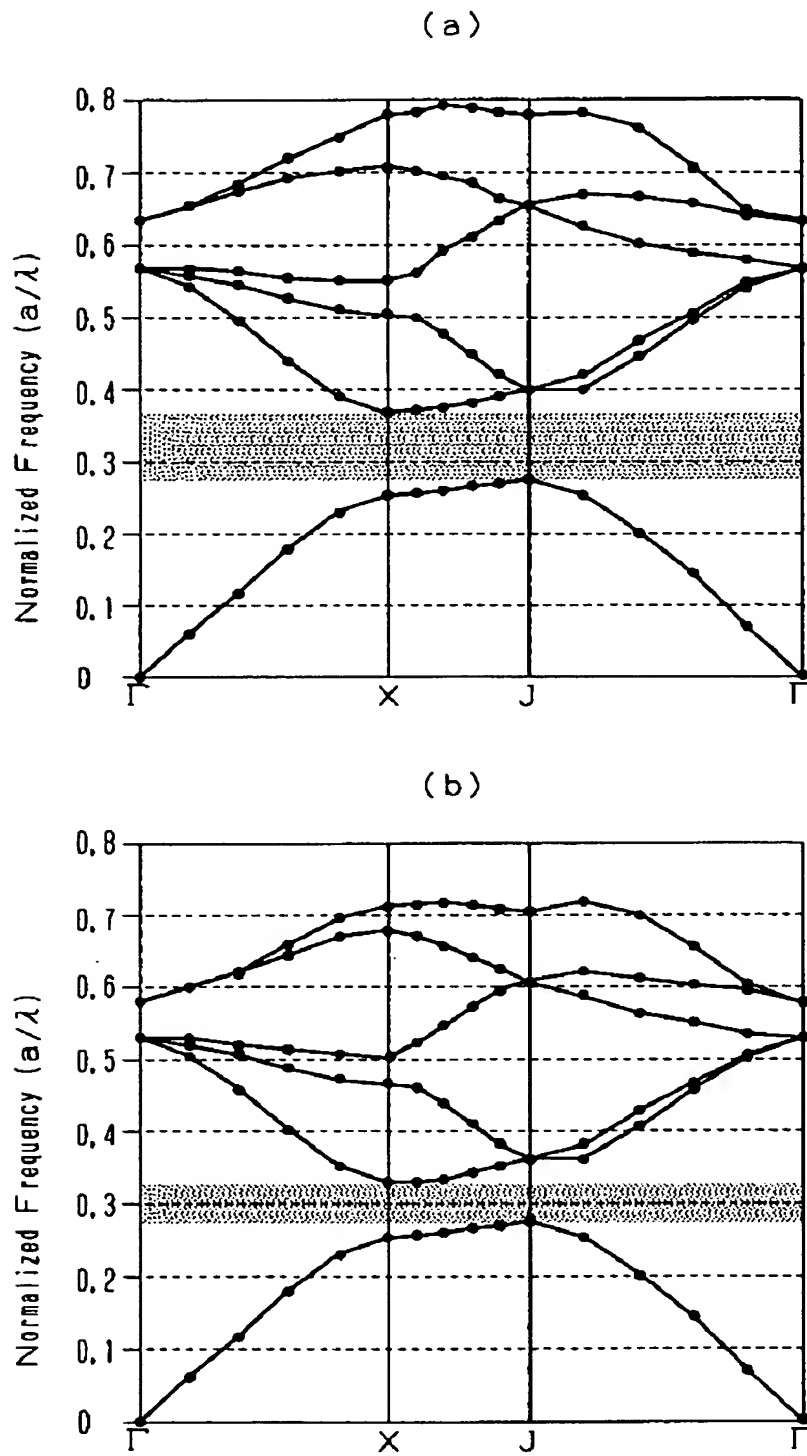
- 1 6 3 フォトニック結晶線欠陥導波路
- 1 6 4 光結合部分

【書類名】 図面

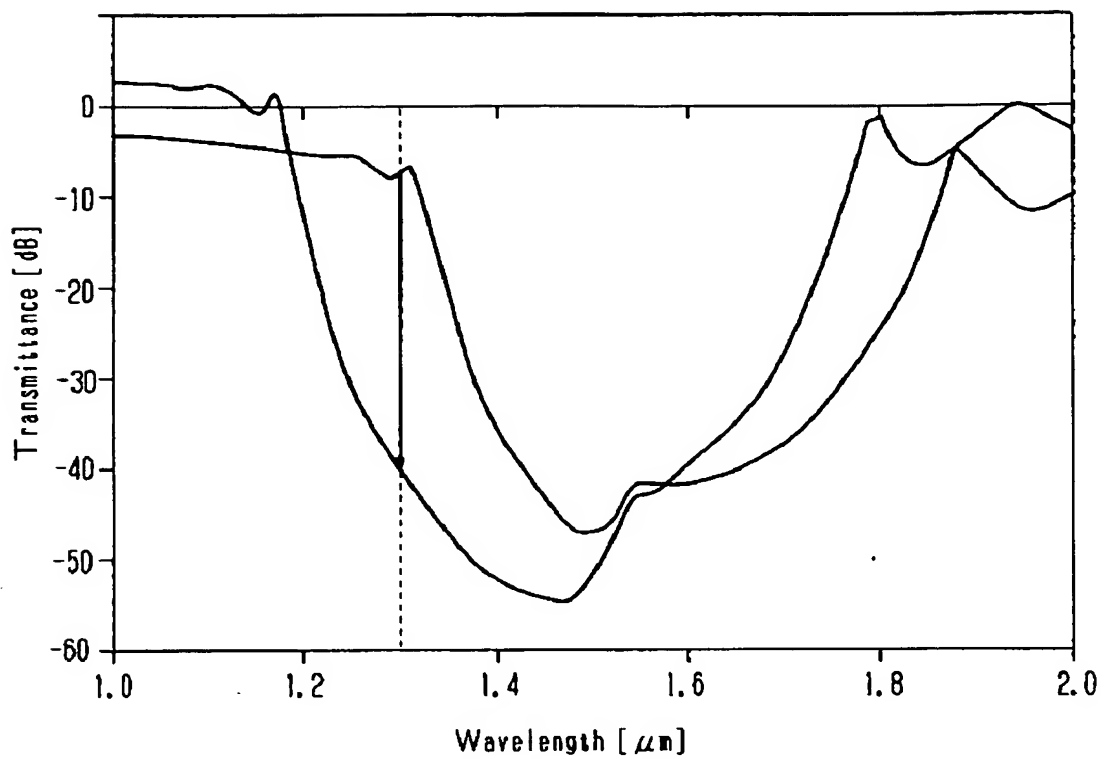
【図 1】



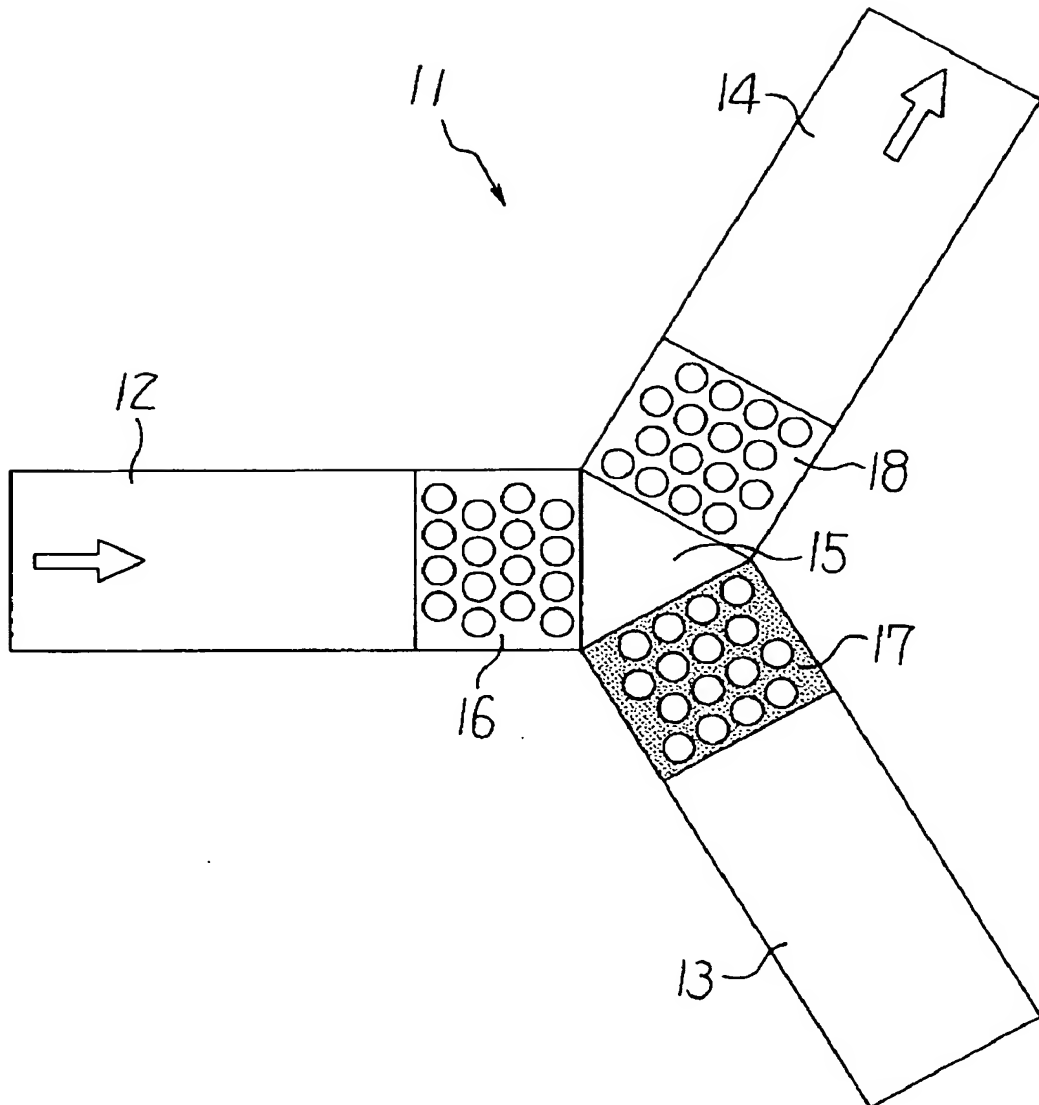
【図 2】



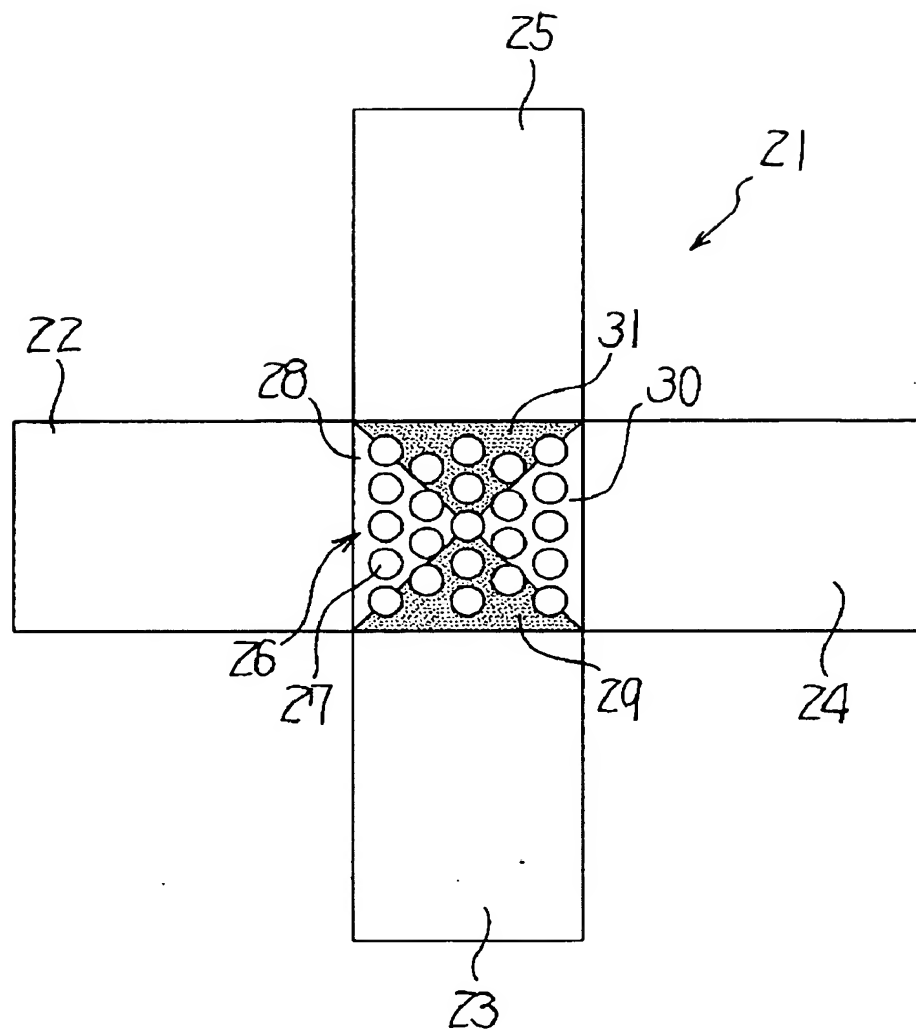
【図 3】



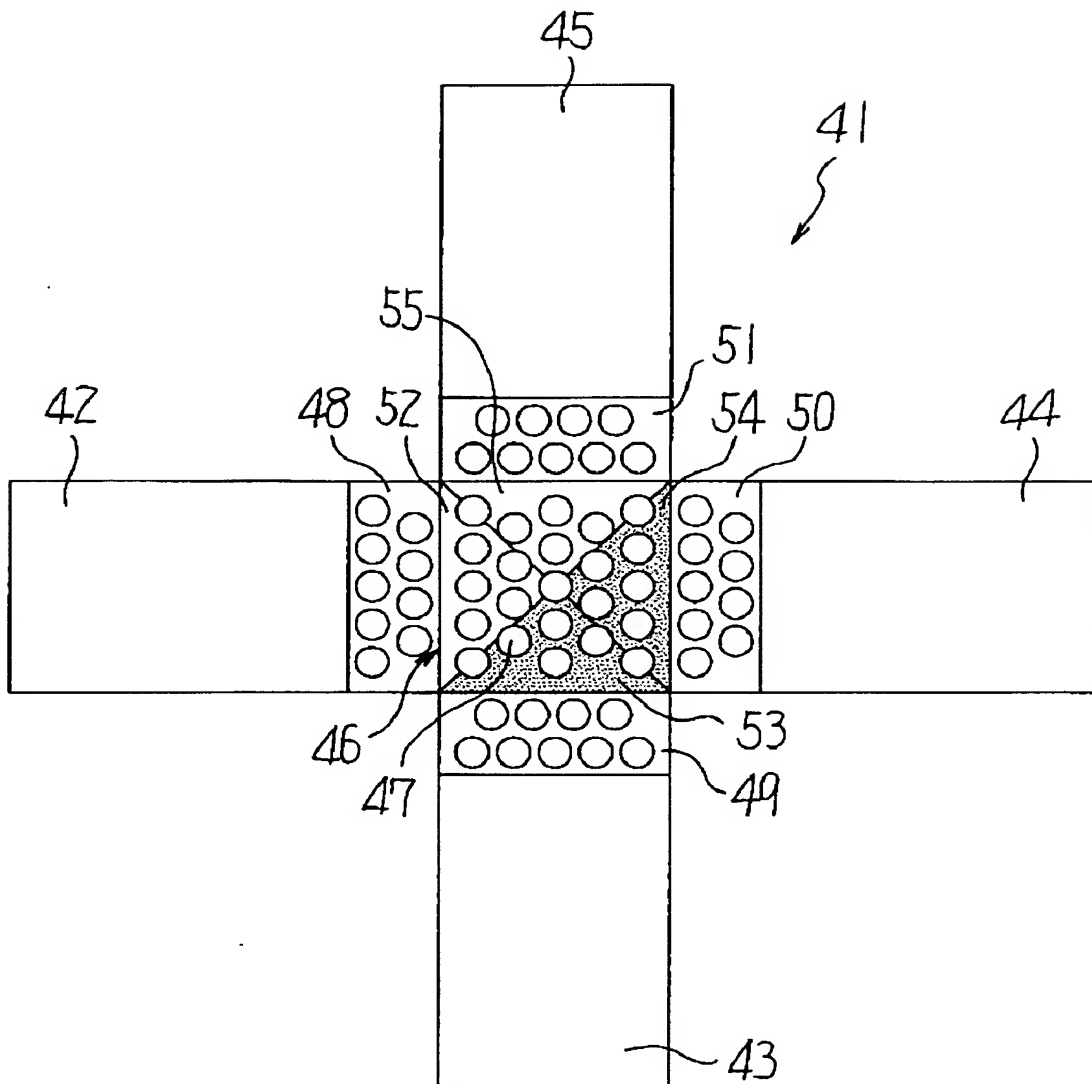
【図 4】



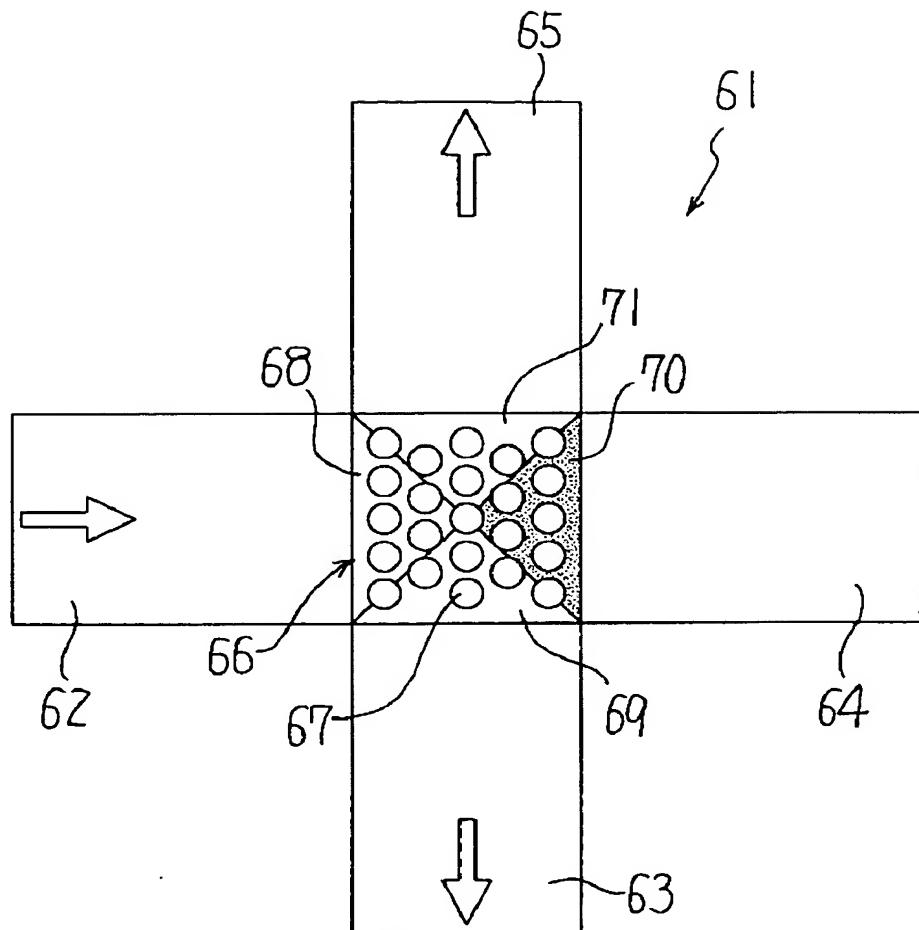
【図 5】



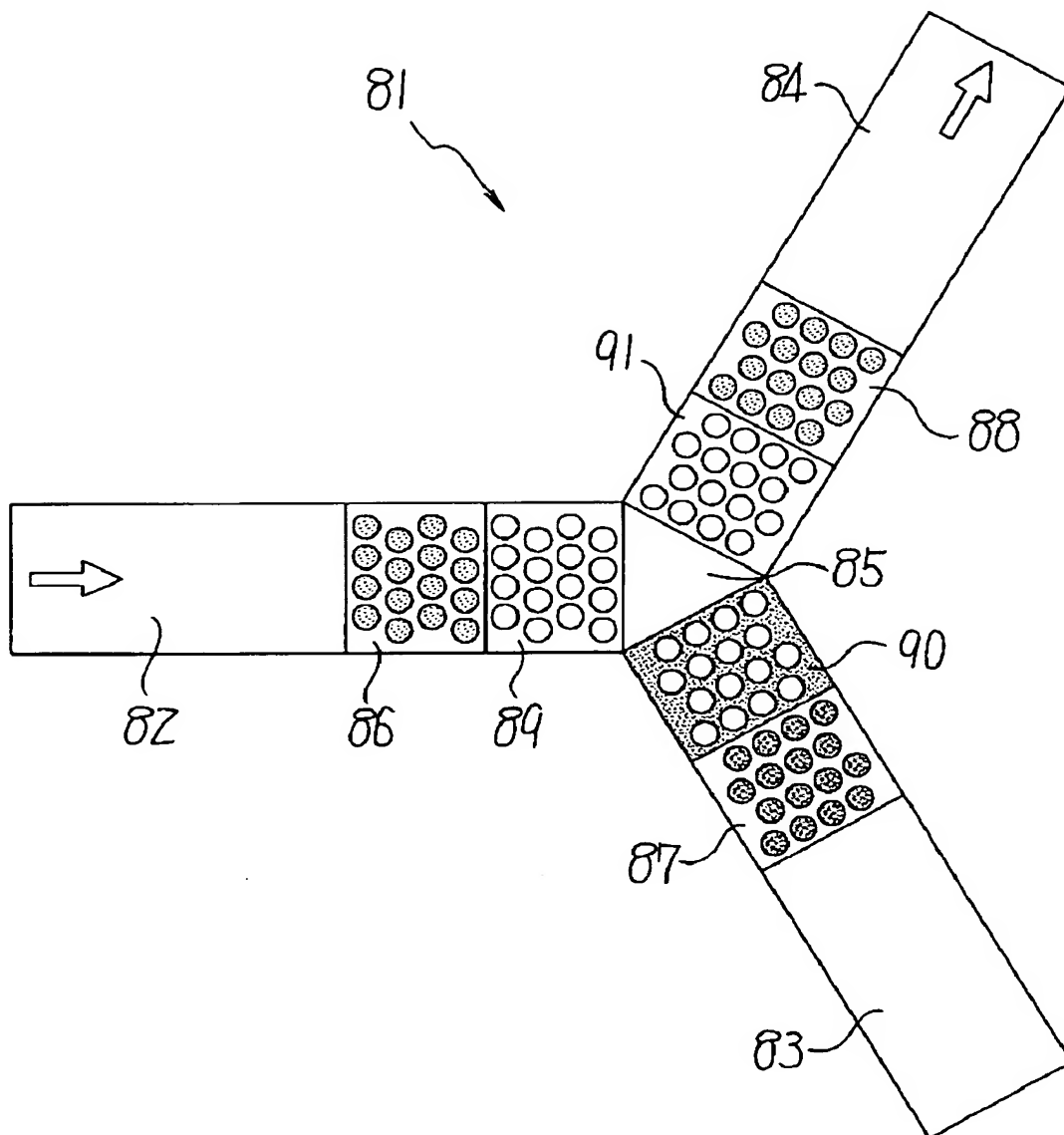
【図 6】



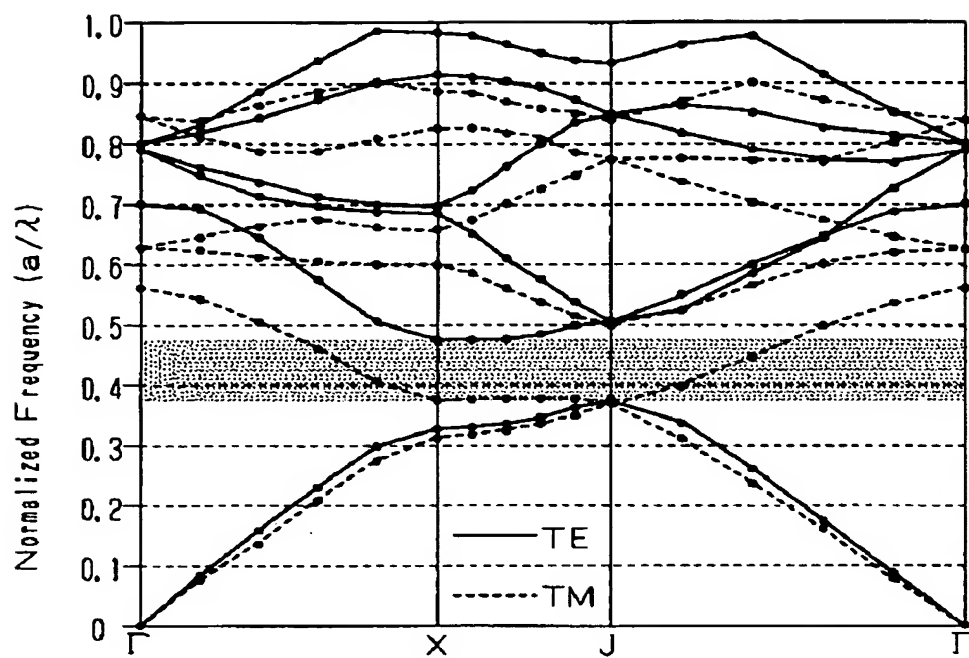
【図 7】



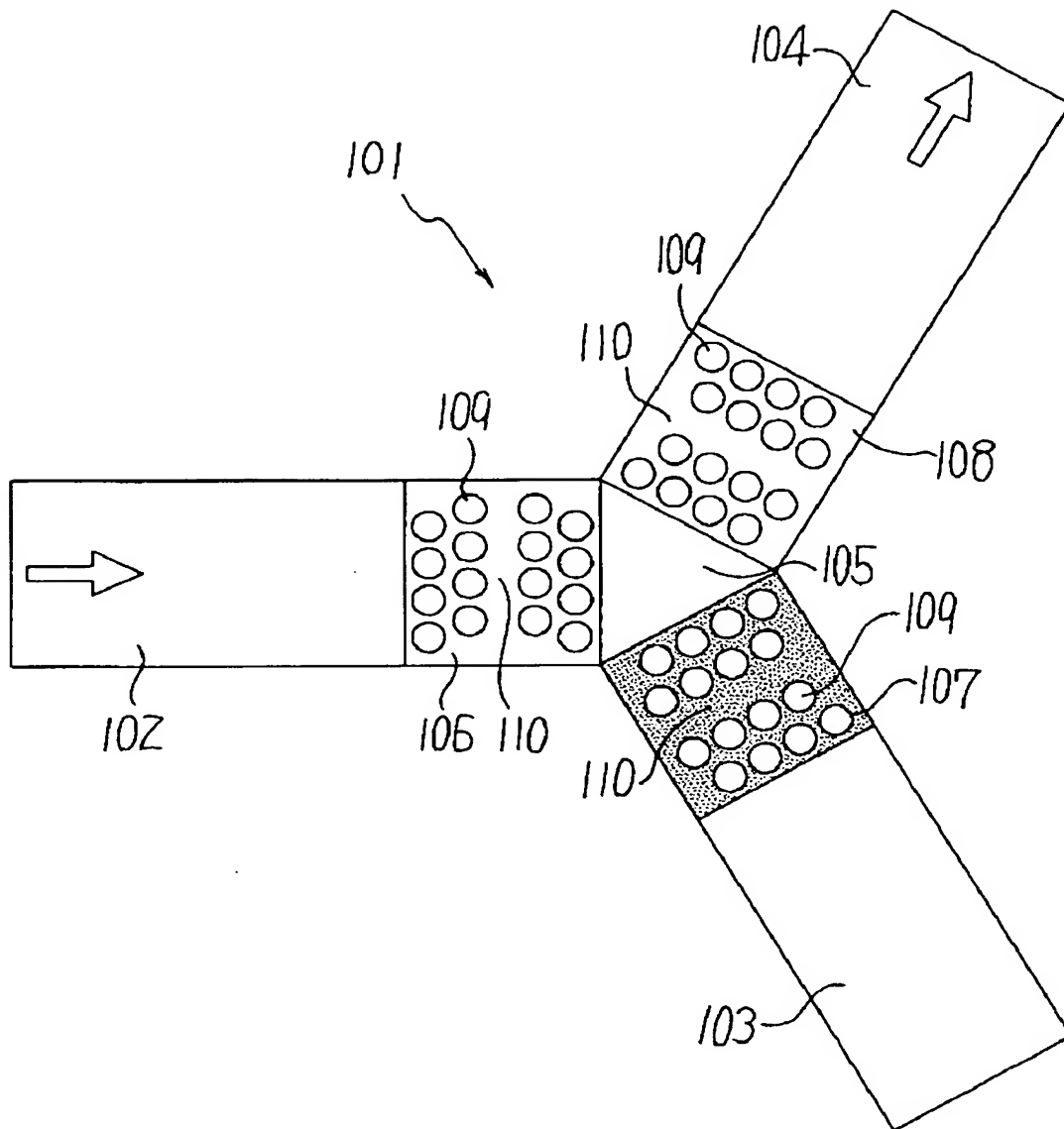
【図 8】



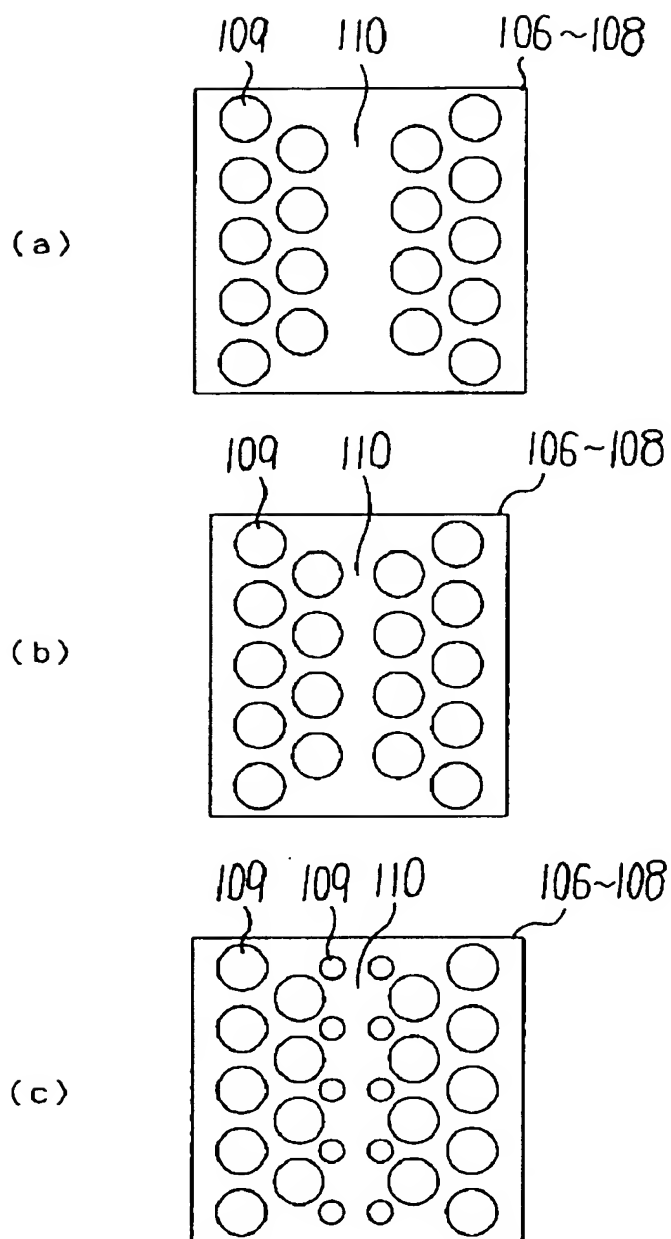
【図 9】



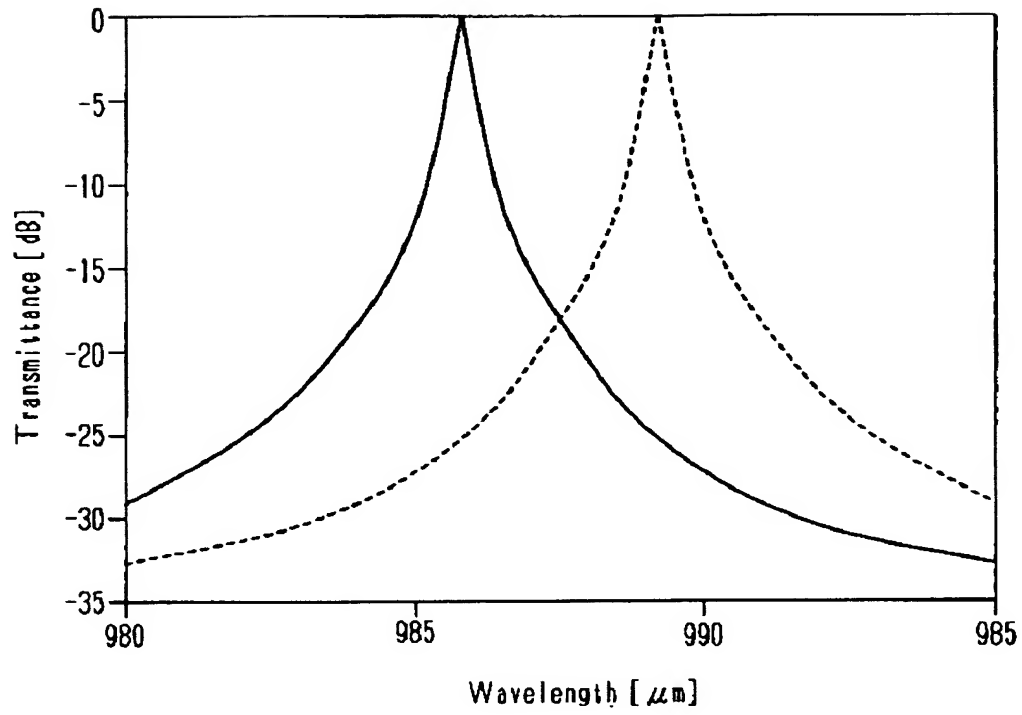
【図 10】



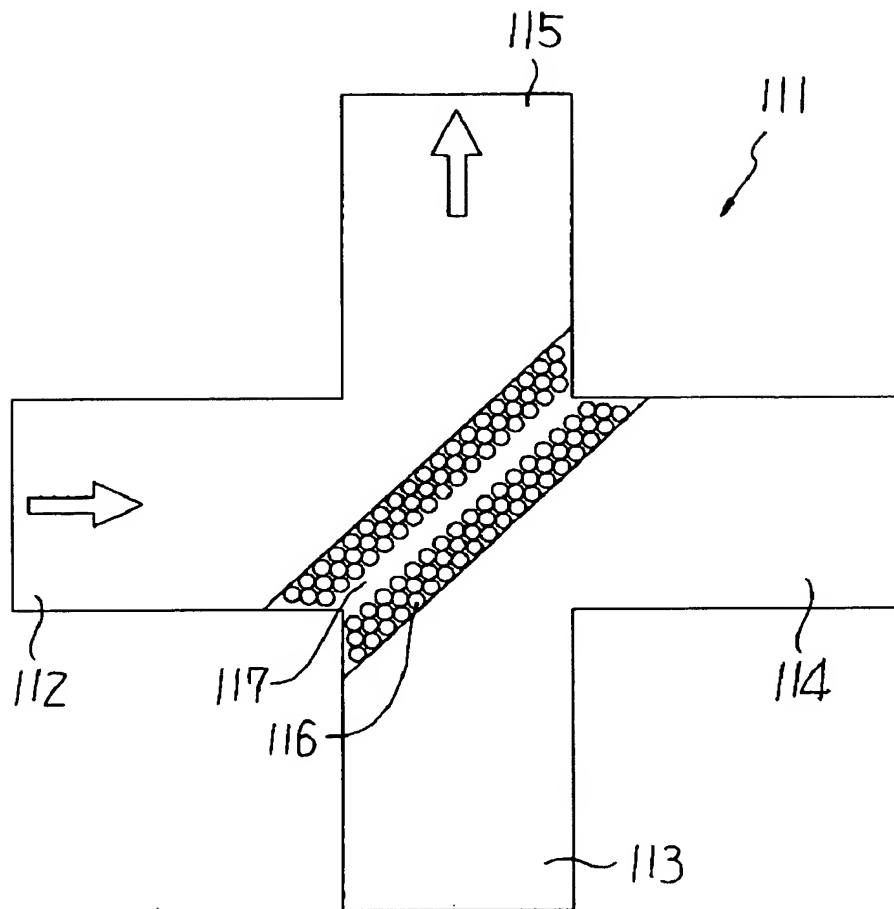
【図 11】



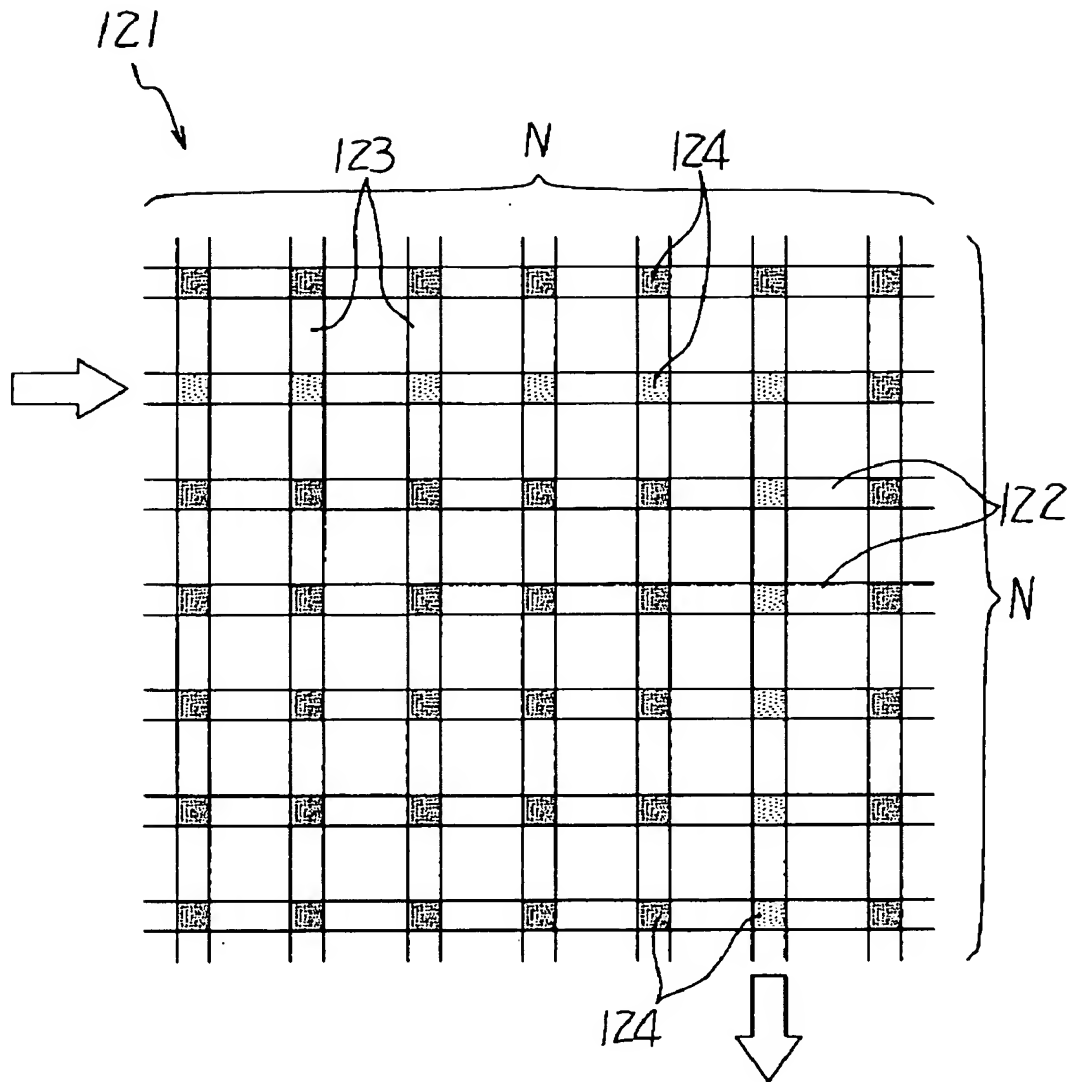
【図 12】



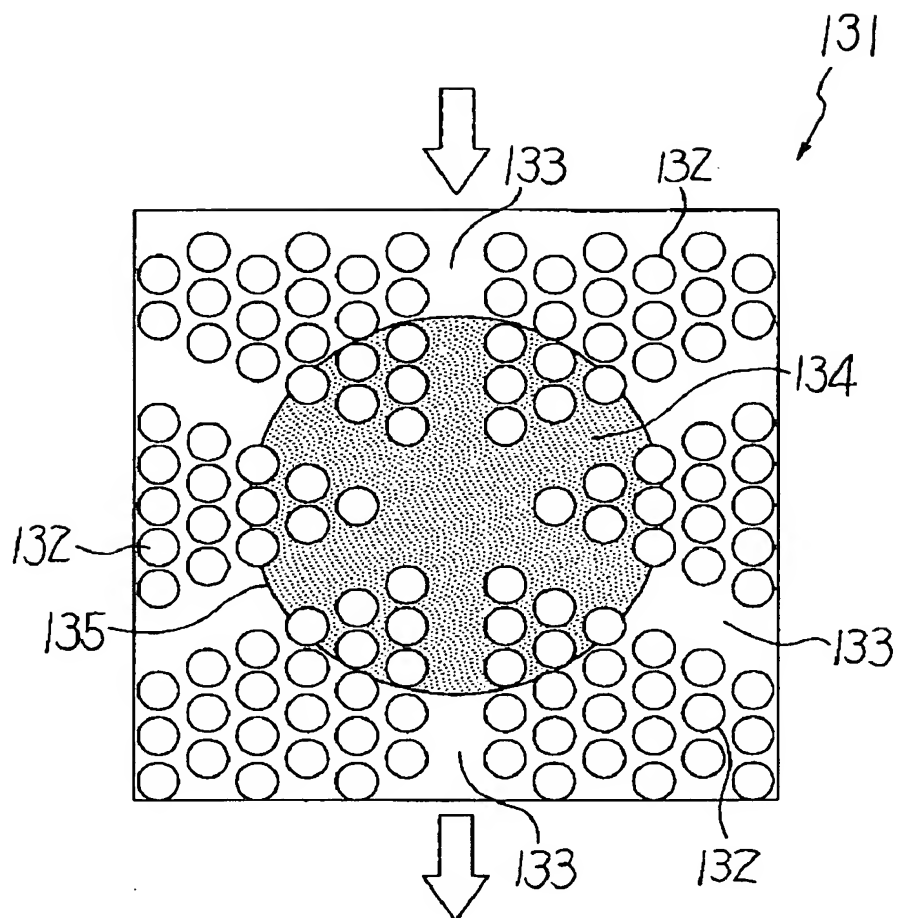
【図 13】



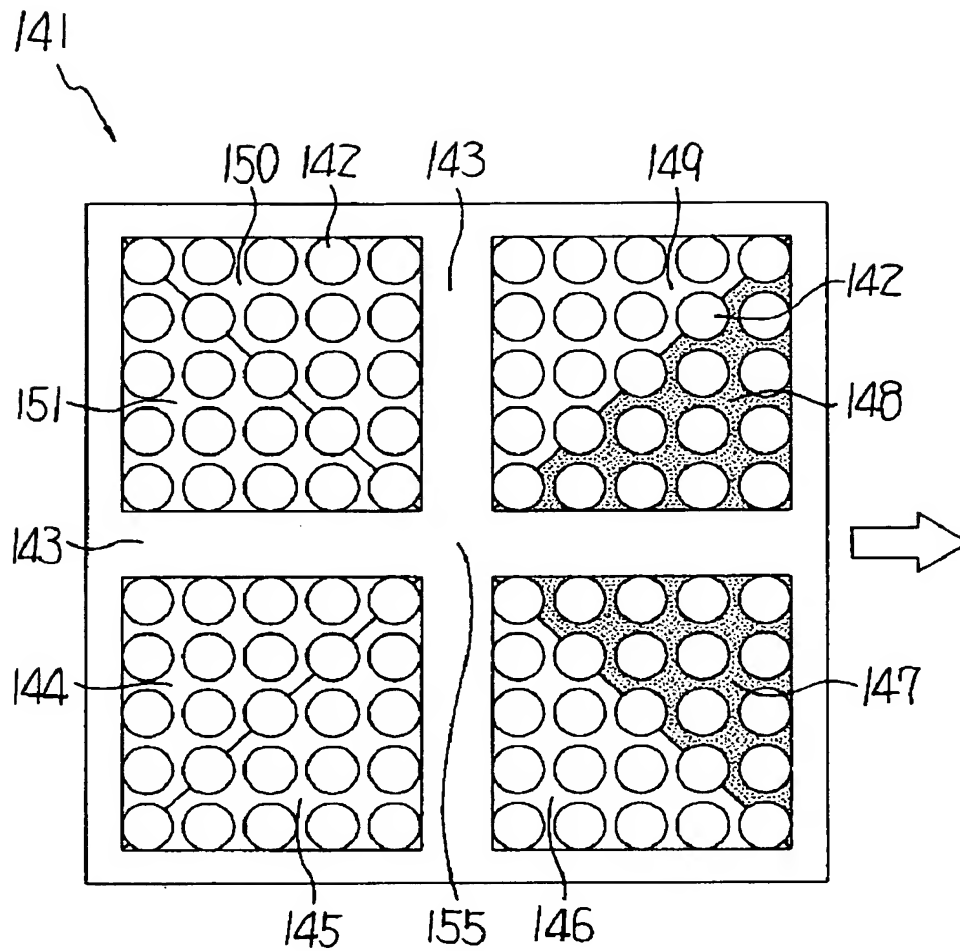
【図 14】



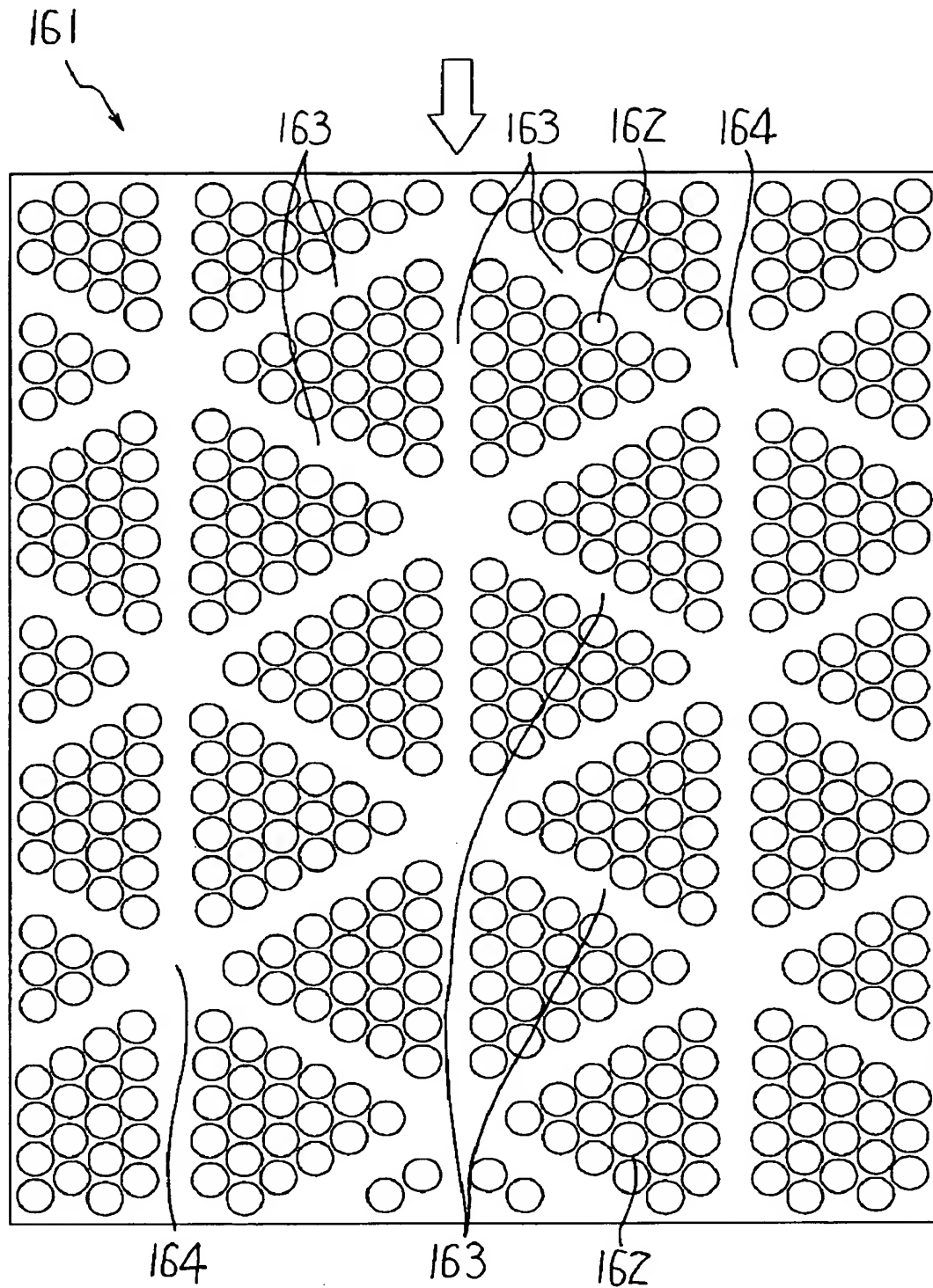
【図 15】



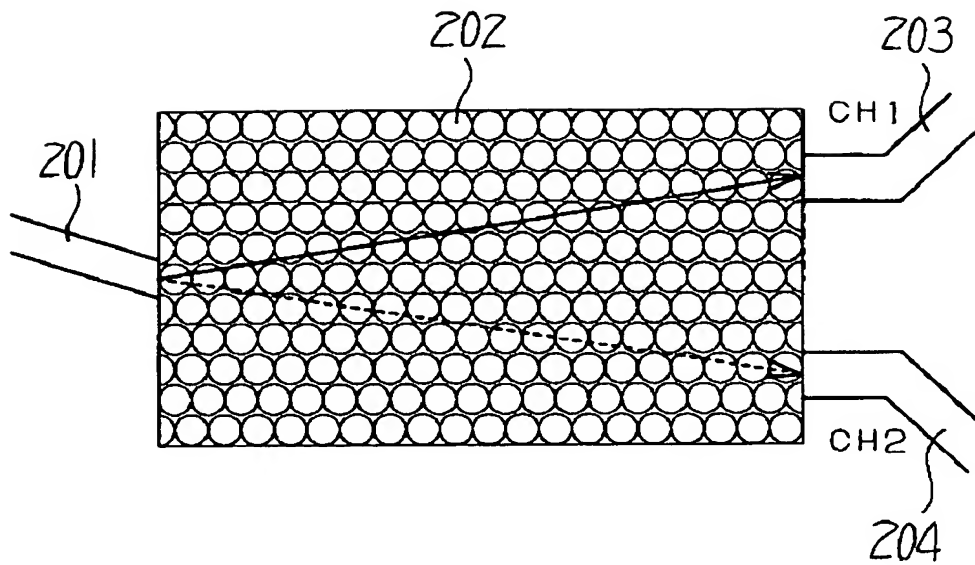
【図 16】



【図 17】



【図 18】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 フォトニック結晶構造部分の屈折率を変調することで各種の光路変更を実現できる小型で高性能な光制御素子を提供する。

【解決手段】 基板 2 と、この基板 2 上に形成された光導波路 3, 4, 5 と、基板 2 上にフォトニック結晶構造 7 により形成されて光導波路 3, 4, 5 が接続された光結合部品 6 と、フォトニック結晶構造 7 の一部に設けられて光結合部品 6 を少なくとも 2 つの領域 8, 9 に区分する屈折率可変部分と、を備え、屈折率可変部分の屈折率を変化させることで区分される領域の界面で少なくとも 1 つの波数に対して反射作用を呈して光の進行方向を変化させる構成により、光信号の経路変換器を光導波路と同程度の幅を持つ微細な面積にて実現できるようにした。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 3 - 1 1 3 5 9 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 6 7 4 7]

1. 変更年月日	2 0 0 2 年 5 月 1 7 日
[変更理由]	住所変更
住 所	東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号
氏 名	株式会社リコー